RAPPORTS

Direction Générale de la Prévention des Risques

Service des Risques Naturels et Hydrauliques

Décembre 2013

Guide méthodologique :

Plan de prévention des risques littoraux

Ministère de l'Écologie, du Développement durable, et de l'Energie

www.developpement-durable.gouv.fr

Ce document a été réalisé sous la maîtrise d'ouvrage
de la **Direction Générale de la Prévention des Risques** (DGPR)
du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Energie (MEDDE)

Coordination de la rédaction
Direction générale de la prévention des risques – bureau des risques météorologiques

Comité de pilotage
Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR)
Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF)
Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques (CERTU)
Centre d'Études Techniques de l'Équipement de l'Ouest (CETE de l'Ouest)

Catherine AZZAM (DGPR), Sabine BAILLARGUET (DGPR), Aurélien BOUET (DGPR), Édouard BRODHAG (CERTU), Guy DESIRE (CETE Ouest), Alexandre KAVAJ (DGPR), Céline PERHERIN (CETMEF), Amélie RENAUD (DGPR)

L'élaboration de ce document a mobilisé de nombreux contributeurs qui ont participé à des groupes de travail thématiques. Nous remercions l'ensemble des personnes ayant collaboré par leurs études, leurs contributions écrites, leurs relectures :
Catherine AZZAM (DGPR), Josiane BADO (DDTM 17), Jean-Marc BAZIERE (DDTM 50), Ludovic BOCQUIER (DREAL Pays de Loire), François BOUTTES (CETMEF), Édouard BRODHAG (CERTU), Gérard COBIGO (DDTM 85), Stéphane COSTA (Université de Caen) - Animateur du sous-groupe Analyse du fonctionnement du littoral, Yann DENIAUD (CETE Nord-Picardie), Guy DESIRE (CETE Ouest), Jean-Paul DUCATEZ (DHI), Virginie DUVAT (Université de La Rochelle), Mohamed El FADILI (CETMEF), Bénédicte EZVAN (SHOM), Didier FELTS (CETE Sud-Ouest), Nicolas FLOUEST (CETE Sud-Ouest), Gérald GARRY (DGALN), Loïc GOUGET (ONF), Nicholas GRUNNET (DHI), Bénédicte GUERINEL (DREAL Languedoc-Roussillon), Bernard GUEZO (CERTU), Luc HAMM (ARTELIA), François HEDOU (CETMEF), Marc IGIGABEL (CETMEF), Mathieu HELLEGOUARCH (DHI), Julien HENIQUE (DREAL Nord-Pas de Calais), Xavier KERGADALLAN (CETMEF), Jean-Philippe LALANDE (DGPR), Erwan LE CORNEC (GEOS), Fabrice LECORNU (IFREMER), Régis LEYMARIE (Conservatoire du Littoral), Franck LEVOY (Université de Caen), Carlos OLIVEROS (BRGM) – Animateur du sous-groupe Caractérisation des évolutions du littoral, Rodrigo PEDREROS (BRGM), Pierre PEETERS (HYDRATEC), Céline PERHERIN (CETMEF) - Animatrice du sous-groupe Submersion marine, Frédéric PONS (CETE Méditerranée), Frédéric RAOUT (DGALN), Amélie RENAUD (DGPR), Florence RICHARD (DREAL Bretagne), Amélie ROCHE (CETMEF), Céline ROUX (SHOM), Nicolas ROUXEL (CETE Ouest), Marie-Hélène RUZ (Université du Littoral – Côte d'Opale), François SABATIER (Aix-Marseille Université - CEREGE), Isabelle SCHALLER (DDTM 17), Anne SOUQUIERE (CETMEF), Serge SUANEZ (Université de Bretagne Occidentale/IUEM), Anne-Laure TIBERI-WADIER (CETMEF), Céline TRMAL (CETE Méditerranée), Romaric VALLAUD (CERTU), Cyril VANROYE (DDTM 85) - Animateur du sous-groupe Prise en compte des ouvrages de protection

SOMMAIRE

PRÉFACE....8

INTRODUCTION....11

LE DÉROULEMENT GÉNÉRAL DE LA DÉMARCHE PPRL....13

1.1 - La conduite de la démarche....14

1.1.1 -L'objectif d'un plan de prévention des risques littoraux....14

1.1.2 -Une approche d'ensemble....15

1.1.3 -La mise en place d'un mode projet....16

1.2 - La procédure d'élaboration....18

1.2.1 -L'association et la concertation....18

1.2.2 -La prescription du PPRL....19

1.2.3 -L'élaboration du PPRL....19

1.2.3.a - L'analyse du fonctionnement du littoral....19

1.2.3.b - La caractérisation et qualification de l'aléa....20

1.2.3.c - L'analyse des enjeux....21

1.2.3.d - L'élaboration du dossier réglementaire....21

1.2.4 -La consultation des services et des collectivités....21

1.2.5 -L'enquête publique 22

1.2.6 -L'approbation du PPRL....23

1.2.7 -L'application anticipée....24

1.2.8 -La procédure de révision et de modification des PPRL....24

2 - CARACTÉRISATION ET QUALIFICATION DES DIFFÉRENTS ALÉAS....25

2.1 - Analyse générale du fonctionnement du littoral....26

2.1.1 -Une étude des aléas littoraux en deux phases....26

2.1.2 -Synthèse de l'analyse du fonctionnement du littoral : identification des facteurs à l'origine des aléas littoraux....27

2.1.2.a - Le recul des côtes rocheuses et à falaises....28

2.1.2.b - Le recul des côtes basses meubles et la migration dunaire....28

2.1.2.c - La submersion marine....28

2.1.2.d - Résultats attendus de la phase 1....29

2.1.2.e - Articulation des phases 1 et 2....30

2.2 - Aléa recul du trait de côte (érosion)....31

2.2.1 -Définition du recul du trait de côte....31

2.2.2 -Choix des valeurs de référence....32

2.2.2.a - Détermination du taux moyen de recul annuel Tx....32

1Généralités....32

2Côtes basses meubles protégées....39

3Côtes à falaises....46

2.2.2.b - Détermination du recul maximal ponctuel lié à un événement majeur Lmax....47

1Généralités....47

2Côtes basses meubles....47

3Côtes à falaises....53

2.2.3 -Caractérisation de l'aléa de référence....57

2.2.4 -Qualification de l'aléa....58

2.2.5 -Estimation d'un aléa recul du trait de côte intégrant l'impact du changement climatique....58

2.2.6 -Résultats attendus....59

2.3 - Aléa migration dunaire....60

2.3.1 -Définition de la migration dunaire....60

2.3.2 -Choix des valeurs de référence....61

2.3.3 -Caractérisation de l'aléa de référence....61

2.3.4 -Qualification de l'aléa....61

2.3.5 -Résultats attendus....62

2.4 - Aléa submersion marine....63

2.4.1 -Définition de la submersion marine....63

2.4.2 -Démarche générale....65

2.4.3 -Détermination des scénarios étudiés et de leurs caractéristiques....66

2.4.3.a - Scénario de référence et autres scénarios étudiés....66

2.4.3.b - Phénomènes naturels à l'origine de l'inondation....67

2.4.3.c - Choix de l'événement naturel de référence....69

1Généralités....69

2Définition du niveau marin de référence....70

Démarche générale....70

Prise en compte du changement climatique dans le niveau marin....73

Prise en compte des incertitudes dans le niveau marin....74

Prise en compte d'autres phénomènes dans le niveau marin....75

Le marégramme 77

3Choix du niveau de référence en estuaire....79

4Définition des caractéristiques de l'événement de référence en dehors de débordement significatifs....83

5Evolution de l'événement de référence le long du littoral 84

6Estimation des volumes débordants....85

7Estimation des volumes franchissant par paquets de mer....87

2.4.3.d - Prise en compte des structures jouant un rôle de protection et de leurs défaillances....91

1Les ouvrages de protection....91

Principes....91

Ouvrages considérés....92

Critère de choix du mode de défaillance des ouvrages pour la caractérisation de l'aléa de référence....92

2Les dispositifs hydrauliques....95

3Les remblais....96

4Les cordons naturels....96

2.4.4 -Choix de la méthode de caractérisation et de cartographie de l'aléa....98

2.4.4.a - Superposition du niveau marin de référence à la topographie....98

2.4.4.b - Répartition topographique des volumes entrants sur la topographie....104

2.4.4.c - Utilisation de modèles numériques....106

1Généralités....106

2Prise en compte de l'occupation du sol dans les modèle 2D....110

2.4.4.d - Analyses menant à la caractérisation de l'aléa....111

1Démarche générale....111

2Secteurs soumis aux chocs de vagues et aux projections....113

3Bande de précaution relative aux structures jouant un rôle de protection....113

2.4.5 -Qualification de l'aléa....116

2.4.5.a - Échelle de qualification....116

2.4.5.b - Mode de qualification....116

2.4.5.c - Niveau d'aléa très fort....118

2.4.5.d - Autres aléas liés à la submersion marine....118
2.4.6 -Résultats attendus....118

3 - MÉTHODE D'ANALYSE DES ENJEUX....120
3.1 - Objectifs de l'analyse des enjeux....122
3.2 - Périmètre et démarche d'étude....123
3.3 - Enjeux généraux....124
3.3.1 -Les enjeux incontournables....124
3.3.2 -Les enjeux complémentaires....125
3.3.3 -Les autres éléments de contexte....126

4 - ÉLABORATION DU DOSSIER DE PPRL....127
4.1 - La note de présentation et ses annexes....128
4.2 - Le zonage réglementaire....129
4.2.1 -Principes appliqués au zonage réglementaire dans le cadre de la submersion marine....130
4.2.1.a - Elaboration du zonage réglementaire....130
1S'agissant de l'aléa de référence actuel....130
2S'agissant de l'aléa à l'horizon 100 ans....131
4.2.1.b - La prise en compte des ouvrages de protection « résistant à l'aléa de référence »....133
4.2.2 -Principes appliqués au zonage réglementaire dans le cadre du recul du trait de côte et de la migration dunaire....136
4.2.3 -La représentation cartographique....137
4.3 - Le règlement....138
4.3.1 -La réglementation des projets....139
4.3.1.a - Les dispositions applicables en zones rouges....139
4.3.1.b - Les dispositions applicables en zones bleues....140
4.3.1.c - Les dispositions applicables pour les zones d'intérêt stratégique....140
4.3.1.d - Questions transversales à l'ensemble des zones....141
1Questions relatives à l'urbanisme....141
2Questions spécifiques au littoral....142
4.3.2 -Les mesures de prévention, protection et sauvegarde....145
4.3.3 -Les mesures sur les biens et activités existants....146

5 - ANNEXES....148
5.1 - Glossaire....149
5.1.1 -Glossaire général....149
5.1.1.a - Définitions générales....149
5.1.1.b - Notion de « référence »....150
5.1.2 -Glossaire technique....150
5.2 - Sigles....153
5.3 - Synthèse des résultats attendus lors de l'étude des aléas littoraux....154
5.4 - Références juridiques concernant les PPR naturels....157

5.5 - Principales références bibliographique.....158
5.6 - Index des encarts.....162
5.7 - Index des illustrations :.....163
5.8 - Table des matières.....166

Préface

Le littoral concentre les pressions sur un territoire restreint. Lieu de développement économique, urbanistique ou encore récréatif, il offre un ensemble de ressources et d'opportunités spécifiques. Parallèlement, il est soumis à des assauts naturels qui en font un espace en mouvements constants générant dangers et fragilités.
L'enjeu consiste alors à concilier l'attractivité et le développement économique de ces territoires avec les différents aléas (recul du trait de côte, submersion marine, inondations, ...) auxquels il est soumis, avec pour fil conducteur la protection des personnes et des biens.
Étendues sur 7 500 km de côtes (5 853 km pour la métropole et 1 647 km pour les DOM), les côtes françaises sont en perpétuel mouvement, dépendantes des flux sédimentaires littoraux et fluviaux. Les aménagements anthropiques du siècle dernier, liés au fort développement économique de ces territoires à compter de cette période, sont venus perturber ces équilibres.

Les dernières projections réalisées confirment la nécessité d'organiser de manière plus durable l'aménagement de notre territoire. Pour les 136 plus grandes villes côtières à l'échelle du globe, les dommages économiques liés aux inondations sont estimés à 6 milliards de dollars par an en 2005, et pourraient grimper à 50 milliards de dollars par an en 2050 du fait de l'accroissement démographique, voire à mille milliards de dollars si l'on intègre le changement climatique (Nature, 18 août 2013, Stéphane Hallegatte et al.). En France, d'après les travaux de l'Insee (projection centrale), la population des départements littoraux devrait croître de 19 % entre 2007 et 2040, soit 4,5 millions d'habitants en plus.
Entre 1880 et 2011, le niveau moyen des mers a augmenté de 1,8 mm par an. Si l'on s'attache plus particulièrement à la période 1993-2011, la hausse moyenne était de l'ordre de 2,88 mm à 3,33 mm par an.

Le Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie organise dans ce domaine son action en trois axes :

- l'amélioration de la connaissance des phénomènes contribuant au façonnage des espaces littoraux par la mise en place de moyen d'observation complémentaires, la réalisation d'études techniques spécifiques, ou bien encore par la valorisation des données historiques disponibles.

La France a été l'un des premiers pays européen à élaborer une stratégie nationale d'adaptation au changement climatique et à se doter d'un plan national d'adaptation (PNACC) dès 2011. Principalement orienté sur l'amélioration des connaissances, le PNACC retient également des actions opérationnelles comme la prise en compte d'une hypothèse d'élévation du niveau de la mer à court terme mais également à long terme lors de l'élaboration ou la révision de plans de prévention des risques littoraux.

- la mise en sécurité des personnes et des biens par le biais de la réglementation applicable au titre des plans de prévention des risques littoraux mais également par la mise en œuvre des actions inscrites au plan submersion rapide arrêté suite à la tempête Xynthia et aux crues du Var de 2010.

S'agissant plus particulièrement du second point, les événements dramatiques liés à la tempête Xynthia du 28 février 2010 ont mis en évidence la nécessité de réactualiser le cadre méthodologique des plans de prévention des risques littoraux datant de 1997. Dans l'attente de la publication de ce guide, la circulaire du 27 juillet 2011, relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux, a fixé les grands principes méthodologiques. Dans le même temps, la circulaire du 2 août 2010 relative à la mise en œuvre des plans de prévention des risques naturels littoraux a identifié 303 communes comme prioritaires sur l'ensemble du littoral métropolitain français, en raison du risque pour les vies humaines constaté actuellement, ou qui pourrait s'y accroître significativement du fait d'une urbanisation non maîtrisée.

- l’accompagnement des initiatives locales soit au moyen du financement de programmes d’actions de prévention des inondations soit en encourageant des démarches innovantes par des appels à projets nationaux sur la thématique des risques.

Il semble important d’encourager le développement d’une prospective territoriale. Les politiques publiques menées actuellement sur ces territoires doivent inclure des réflexions pour un aménagement durable. La logique d’un « durcissement » continu de nos côtes en termes de protection n’est soutenable ni économiquement ni sur le plan des écosystèmes, à travers les perturbations des transits sédimentaires et de la biodiversité notamment. Pour ce faire, il convient de dépasser le cadre de réflexion de l’échelle communale pour repenser un aménagement du territoire littoral sur le long terme. Entre protection et recomposition spatiale des territoires, il s’agira de trouver le juste équilibre.

La prise en compte des risques littoraux dans l’aménagement d’aujourd’hui et de demain ne doit pas être synonyme de déclin économique de nos territoires. Il faut battre en brèche cette idée que protéger les populations et les activités économiques d’un territoire ne peut qu’aboutir à leur affaiblissement économique. La politique de prévention des risques naturels a été refondée en 1995, complétée en 2003, et en parallèle, la vitalité de nos territoires n’a pas cessé depuis. Aujourd’hui par exemple, la stratégie nationale de gestion des risques d’inondations se construit sur l’idée de préserver l’attractivité et la compétitivité des territoires en gérant mieux le risque d’inondations.
L’effort essentiel de ces prochaines années résidera dans le nécessaire changement d'échelle en matière d’aménagement du territoire, associé à une connaissance sans cesse meilleure des phénomènes et des prévisions. Le dépassement de l’échelle communale pour tendre vers une échelle plus structurante, conjuguant échelle hydrosédimentaire et intercommunalité, doit donner une nouvelle impulsion au dynamisme des territoires et à leur protection.

Patricia BLANC

Directrice générale de la prévention des risques

Introduction

La tempête Xynthia des 27 et 28 février 2010 a révélé l'importance de poursuivre et de développer la mise en œuvre de politiques de prévention des risques littoraux. Dans ce cadre, le guide méthodologique arrêté en 1997, relatif à l'élaboration des plans de prévention des risques littoraux, a été mis en révision.
Cette actualisation du guide méthodologique s'est échelonnée sur plusieurs années en raison d'une part, des modalités arrêtées (constitution de groupe de travail, travail collaboratif entre différents établissements, …), et des compléments méthodologiques apportés entre la version de 1997 et le guide tel qu'arrêté.
En parallèle, deux circulaires sont venus structurer le travail des services déconcentrés. La circulaire du 27 juillet 2011 relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux a permis d'actualiser dans un premier temps le cadre méthodologique en analysant plus spécifiquement les conditions de prise en compte des ouvrages de protection mais également d'intégrer les conséquences du changement dans la réalisation des PPRL dans l'aléa de référence et dans un aléa à plus long terme. La circulaire du 2 août 2011 relative à la mise en œuvre des plans de prévention des risques naturels littoraux a identifié une liste de 303 communes prioritaires, devant aboutir d'ici 2015.

Pour réaliser un plan de prévention des risques littoraux, il convient de se référer en premier lieu au guide général relatif à l'élaboration des plans de prévention des risques naturels. Le guide méthodologique relatif aux plans de prévention des risques littoraux (PPRL) vient préciser les spécificités liées aux risques littoraux mais également les points d'attention spécifiques au littoral. Dans un souci de clarté du propos, des éléments synthétiques de procédure sont introduits dans le guide PPRL afin de guider le lecteur dans l'élaboration du document.
D'autre part, le guide méthodologique relatif aux PPRL vient compléter et préciser le cadre méthodologique mis à jour par la circulaire du 27 juillet 2011 précitée.

Afin de faciliter la diffusion auprès des services, il a été retenu de compléter ce guide par des fascicules techniques spécifiques. Un premier fascicule sur l'analyse du fonctionnement du littoral sera très prochainement publié.

La notion de risques littoraux recouvre les notions suivantes :

- le recul du trait de côte,
- la migration dunaire,
- la submersion marine liée à un phénomène tempétueux (ce qui exclut le tsunami qui a pour origine un phénomène sismique ou un glissement des fonds marins).

Le déroulement général de la démarche PPRL

1.1 - La conduite de la démarche

1.1.1 - L'objectif d'un plan de prévention des risques littoraux

En matière de prévention des risques naturels, l'État fonde son action sur des enjeux de sécurité des personnes et des biens, mais également sur des objectifs de réduction des dommages aux biens et aux activités économiques par la réglementation des projets existants et l'encadrement des projets nouveaux sur le territoire communal.

Le titre VI du code l'environnement (article L562-1 et suivants), dans sa partie législative, complété par le titre 6 de la partie réglementaire (article R561-1 et suivants), posent la cadre juridique d'action des services de l'Etat en matière de réalisation de plans de prévention des risques naturels.

L'article L562-1 du code de l'environnement pose le cadre général d'intervention du PPR :
« I.-L'Etat élabore et met en application des plans de prévention des risques naturels prévisibles tels que les inondations, les mouvements de terrain, les avalanches, les incendies de forêt, les séismes, les éruptions volcaniques, les tempêtes ou les cyclones.

II.-Ces plans ont pour objet, en tant que de besoin :

1° De délimiter les zones exposées aux risques, en tenant compte de la nature et de l'intensité du risque encouru, d'y interdire tout type de construction, d'ouvrage, d'aménagement ou d'exploitation agricole, forestière, artisanale, commerciale ou industrielle ou, dans le cas où des constructions, ouvrages, aménagements ou exploitations agricoles, forestières, artisanales, commerciales ou industrielles, notamment afin de ne pas aggraver le risque pour les vies humaines, pourraient y être autorisés, prescrire les conditions dans lesquelles ils doivent être réalisés, utilisés ou exploités ;

2° De délimiter les zones qui ne sont pas directement exposées aux risques mais où des constructions, des ouvrages, des aménagements ou des exploitations agricoles, forestières, artisanales, commerciales ou industrielles pourraient aggraver des risques ou en provoquer de nouveaux et y prévoir des mesures d'interdiction ou des prescriptions telles que prévues au 1° ;

3° De définir les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde qui doivent être prises, dans les zones mentionnées au 1° et au 2°, par les collectivités publiques dans le cadre de leurs compétences, ainsi que celles qui peuvent incomber aux particuliers ;

4° De définir, dans les zones mentionnées au 1° et au 2°, les mesures relatives à l'aménagement, l'utilisation ou l'exploitation des constructions, des ouvrages, des espaces mis en culture ou plantés existants à la date de l'approbation du plan qui doivent être prises par les propriétaires, exploitants ou utilisateurs.

III.-La réalisation des mesures prévues aux 3° et 4° du II peut être rendue obligatoire en fonction de la nature et de l'intensité du risque dans un délai de cinq ans, pouvant être réduit en cas d'urgence. A défaut de mise en conformité dans le délai prescrit, le préfet peut, après mise en demeure non suivie d'effet, ordonner la réalisation de ces mesures aux frais du propriétaire, de l'exploitant ou de l'utilisateur. [...] »

Des circulaires sont venues compléter et préciser le cadre et la méthodologie d'élaboration des différents plans de prévention des risques naturels. En matière d'inondation, on pourra se référer à la circulaire du 24 janvier 1994, relative à la prévention des inondations et à la gestion des zones inondables, et celle du 24 avril 1996, re-

lative aux dispositions applicables aux bâtis et ouvrages existants en zones inondables, lesquelles ont mis en exergue deux principaux objectifs de la politique de prévention des risques : interdire les implantations humaines dans les zones les plus dangereuses et réduire la vulnérabilité.
Suite à la tempête Xynthia de 2010 et à ses conséquences dramatiques sur le littoral Atlantique, la circulaire du 27 juillet 2011 est venue compléter et préciser les règles applicables en matière de prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux. En effet, pour réaliser les 303 PPRL prioritaires arrêtés identifiés puis publiés en août 2011, et dans l'attente de la mise à jour de l'ensemble du guide méthodologique, la circulaire a posé un premier cadre méthodologique.
Parmi les apports majeurs de cette circulaire, on peut noter :

- la prise en compte des ouvrages de protection dans la dynamique de submersion,
- la prise en compte des conséquences liées au changement climatique dans l'aléa de référence mais également en anticipant les conséquences à plus long terme de par l'aléa à échéance 100 ans (dit aléa 2100).

Le guide méthodologique permet, au travers d'un document unique, de définir le cadre d'élaboration du plan de prévention des risques littoraux que les services déconcentrés doivent réaliser.

S'inscrivant entièrement dans cette problématique, la directive inondation sera avec les plans de gestion des risques d'inondation (PGRI) l'outil juridique intégrateur des différents outils, plans et dispositifs de vigilance avec une orientation commune majeure de réduction de la vulnérabilité des territoires.

D'un point de vue juridique, le PPR est une servitude d'utilité publique annexée au Plan Local d'Urbanisme (PLU). De ce fait, il agit en addition des réglementations existantes et s'impose au règlement du PLU. Il ne peut pas constituer une justification à une non application d'une autre réglementation.

1.1.2 - Une approche d'ensemble

La réflexion à conduire tient compte des enjeux, des outils de protection existants, de la connaissance des ouvrages de défense contre la mer. Le premier critère de priorité à retenir doit être le risque pour la vie humaine. Des critères de qualification comme la cinétique de la submersion, la vulnérabilité des populations, la pression foncière et l'emprise des zones urbanisées ou urbanisables sont également pris en compte. L'objectif poursuivi par les PPRL est donc avant tout d'empêcher l'aggravation des risques existants pour la population suite à une poursuite de l'urbanisation en zone inondable.

Au niveau national, l'analyse du territoire selon ces critères a permis de conduire à l'identification de 303 communes prioritaires pour l'élaboration de PPRL, qui représentent localement des enjeux forts pour la santé humaine[1].

En dehors du cadre des PPRL prioritaires, cette réflexion est menée par l'autorité administrative (Préfet/DDTM ou DREAL) après consultation le cas échéant de la commission départementale des risques naturels majeurs (CDRNM). Elle peut également intervenir dans le cadre de l'élaboration d'un schéma de prévention des risques naturels majeurs. Ce schéma peut établir des priorités d'actions en fonction des obligations réglementaires nationales, des doctrines régionales ainsi que des niveaux de risques et des contextes locaux.
L'analyse à effectuer repose sur une connaissance d'ensemble des risques littoraux affectant le territoire. Pour ce faire, en complément des informations présentes dans le dossier départemental des risques majeurs (DDRM), les services s'appuieront sur l'historique des événements passés ainsi que sur l'analyse du fonctionnement du littoral.
L'identification de ces territoires peut également découler des analyses établies à l'occasion des stratégies locales issues de la mise en œuvre de la directive inondation.

1 la liste figure en annexe de la circulaire du 2 août 2011 relative à la mise en œuvre des plans de prévention des risques naturels littoraux

Une étude de vulnérabilité menée à l'échelle du bassin de risque, élargissant la typologie des enjeux étudiés, peut alimenter la réflexion stratégique. Une telle étude, effectuée en considérant la vulnérabilité du territoire sous ses différents aspects, améliore la connaissance générale du risque littoral et éclaire les différents PPR à réaliser suivant des priorités d'intervention.

Encart 1 : Exemple d'étude quantitative de vulnérabilité à l'échelle d'un bassin de risque.
Étude sur la vulnérabilité des enjeux à l'érosion et aux différents types d'inondation sur le littoral du Languedoc-Roussillon, réalisée par EID Méditerranée dans le cade du contrat de plan État-Région 2007-2013.

L'étude expérimentale conduite sur 38 communes du littoral languedocien de Le Racou – Port Argelès à Port Camargue - Rhône Vif met en œuvre une méthodologie en 3 étapes :

Étape 1 : Affecter des coefficients d'exposition à l'aléa à chaque point de la zone d'étude.
Dans l'étude considérée, l'aléa submersion marine est représenté par un coefficient d'exposition déterminé par l'application de tableaux prenant notamment en compte les hauteurs d'eau, les périodes de retour, l'historique des tempêtes (à partir des données CatNat) et distinguant la zone littorale de la zone rétro littorale. Une cartographie de synthèse est ensuite réalisée.

Étape 2 : Lister et quantifier les enjeux présents sur l'ensemble des communes.
Les enjeux ici pris en compte sont variés, et s'apparentent fortement à ceux de la directive inondation :
Population vivant dans des habitations de plain-pied / Habitations / Habitations de plain-pied / Hébergements touristiques légers / Établissements publics administratifs et d'appui à la population / Établissements publics d'enseignement / Établissements de type hospitalier / Activités économiques / Emploi / Bâti / Réseau routier / Réseau ferré / Conduites de matières premières / Réservoirs d'eau et stations de pompage / Stations de Traitement des Eaux Usées / Installations Classées pour la Protection de l'Environnement / Établissements SEVESO
Ces enjeux sont à cartographier pour faciliter la compréhension et l'analyse.

Étape 3 : détermination de la vulnérabilité des enjeux
Le croisement des deux cartes produites aux étapes 1 et 2 permet de déterminer pour chaque enjeu un coefficient d'exposition à l'aléa.
Cela permet in-fine, en intégrant l'ensemble des données, de déterminer commune par commune la somme quantitative de chaque enjeu et son niveau moyen d'exposition au risque considéré.

1.1.3 - La mise en place d'un mode projet

Lorsque la décision d'élaborer un PPRL sur un territoire a été arrêtée, il est important de définir un fonctionnement en mode " projet " avec la constitution d'une équipe-projet. Cette équipe assemble les compétences nécessaires à l'élaboration du PPRL en matière de connaissance des spécificités de l'aléa, de prévention, d'aménagement, de systèmes d'informations géographiques, d'urbanisme, d'application du droit des sols…

En fonction du contexte local, un comité de pilotage présidé par le Préfet ou son représentant, peut être mis en place, avec un secrétariat technique.

Un prestataire extérieur peut être mandaté pour la réalisation des études techniques. À la fin de la démarche, le chef de projet veille à ce que le prestataire remette l'ensemble des données utilisées ou créées sous forme papier et numérique.

Les documents élaborés : textuels, graphiques et cartographiques, doivent être compréhensibles par les différents intervenants. Ces documents ont vocation à constituer des outils de dialogue et de concertation fondés sur des objectifs techniques, informatifs et pédagogiques.

Encart 2 : Quel format de données produire ?

Le prestataire doit constituer une base documentaire sous forme informatique.
L'ensemble des photographies et documents écrits fait l'objet d'une numérisation et d'une indexation facilitant sa recherche et sa réutilisation. Ainsi, une base de données ou un tableau de données est créé. Il précise les points suivants:
• le type de documents,
• la date,
• l'auteur du document,
• le lieu-dit, le territoire et/ou la commune concernée par le document,
• les mots clés permettant de préciser les informations contenues dans le document (titre d'article, objets de la photographie, éléments la composant),
• un lien hypertexte vers le document concerné,
• pour les photos, une position géographique avec les coordonnées de la prise de vue lorsque cela est possible.

Le prestataire fournit à l'issue de sa mission, l'ensemble des fichiers informatiques avec un descriptif des métadonnées pour l'ensemble des tables élaborées.

Les données rasters doivent être fournies au format TIF non compressé et au format ECW. Le prestataire doit choisir une résolution de numérisation adaptée (minimum de 300 DPI) à la qualité des documents, pour en assurer un rendu de bonne qualité. L'ensemble des données cartographiques doit être fourni sous format compatible avec le logiciel utilisé par le service.

Les rapports doivent être fournis sous forme de fichier texte ou tableur compatible avec les outils libres bureautique LibreOffice et au format PDF pour leur transmission.

Le système de coordonnées est le système de projection français RGF 93 méridien de Greenwich (Borne Europe).

L'ensemble des données numériques doit être conforme aux dispositions précisées dans ce paragraphe et dans le guide de numérisation des PPR mais également avec les géostandards développés dans le cadre de la COVADIS (www.cnig.gouv.fr).

1.2 - La procédure d'élaboration

1.2.1 - L'association et la concertation

La circulaire du 3 juillet 2007 dite circulaire « concertation » explicite le contexte administratif et réglementaire relatif à l'association et à la concertation.

L'association

L'association a pour objet de favoriser un dialogue régulier entre les principaux acteurs concernés par l'élaboration du PPRL. Initiée le plus en amont possible de la démarche, l'association devra vivre tout au long du projet. Elle est une obligation législative[2]. Précisées dans l'arrêté de prescription[3], les modalités de l'association doivent être ensuite respectées scrupuleusement. Elles constituent le minimum devant être mis en œuvre. Il est donc prudent, au stade de l'arrêté de prescription, d'identifier des modalités suffisantes au regard de la nécessité de l'association, proportionnées et adaptées au PPR, en restant pragmatique afin d'assurer leur mise en œuvre de manière certaine. Le rapport de présentation du PPR devra rendre compte de cette exécution.

Le choix des acteurs associés à la démarche est laissé à l'appréciation du service instructeur. Il intervient en fonction du contexte et des enjeux locaux. Au minimum, sont associés les communes et les établissements publics de coopération intercommunale compétents en matière d'urbanisme, compris en totalité ou en partie dans le périmètre du PPRL. En fonction du contexte local, les chambres consulaires, les services départementaux d'incendie et de secours, ainsi que tout autre acteur dont l'association à la démarche est jugée pertinente, pourront être intégrés.

La concertation

La concertation concerne l'ensemble des acteurs du territoire. Les modalités de mise en œuvre sont définies dans l'arrêté préfectoral prescrivant l'établissement du PPRL[4]. La concertation doit accompagner les grandes étapes d'élaboration, en particulier lors :

- du lancement de la réflexion,
- de l'analyse du fonctionnement du littoral,
- de la présentation des études d'aléa,
- de la présentation des enjeux exposés,
- de la présentation du projet de zonage réglementaire et du règlement.

À l'instar de l'association, le code de l'environnement ne définit pas de modalités précises de concertation. Elles doivent être proportionnées et adaptées au projet de plan. Ainsi, elle peut prendre des formes diverses telles que des réunions publiques, des réunions avec des associations, un site Internet...

En revanche, il est impératif que les modalités de concertation décrites dans l'arrêté de prescription soient suivies. Elles constituent un minimum, qui peut être enrichi au cours de la procédure.

À la fin de la procédure d'élaboration du PPRL, un bilan de la concertation est réalisé. Il retrace d'après l'article

2 Article L.562-3 du code de l'environnement
3 Article R. 562-2 du code de l'environnement
4 Article R. 562-2 du code de l'environnement

L.121-16 du code de l'environnement, l'ensemble des actions conduites et les comptes-rendus de celles-ci. Il est remis au commissaire-enquêteur et joint pour information à la note de présentation du PPRL approuvé.

1.2.2 - La prescription du PPRL

A l'issue des réflexions stratégiques ayant déterminé l'opportunité d'un PPRL, le lancement réglementaire de la démarche d'élaboration est marqué par la prise d'un arrêté préfectoral de prescription. Le contenu de cet arrêté ainsi que les modalités de diffusion et de publicité sont définis à l'article R.562-2 du Code de l'environnement.

L'arrêté préfectoral de prescription précise :

- le service instructeur,
- la nature du ou des risque(s) pris en compte,
- le périmètre mis à l'étude,
- les modalités d'association et de concertation,
- l'obligation ou non de réaliser une évaluation environnementale.

Une fois le PPRL prescrit, le Préfet et ses services disposent d'un délai de trois ans pour élaborer et approuver le document. Ce délai est prorogeable dix-huit mois, une seule fois, pour prendre en compte la complexité du plan, l'ampleur et la durée des consultations.

1.2.3 - L'élaboration du PPRL

L'élaboration d'un plan de prévention des risques est structurée en plusieurs phases nécessitant pour certaines d'entre elles des études techniques.

1.2.3.a - L'analyse du fonctionnement du littoral

L'analyse du fonctionnement du littoral, décrite précisément au chapitre 4.2, est un préalable à la réalisation des études techniques de caractérisation et de qualification de l'aléa, qu'il convient de ne pas négliger. En effet, beaucoup d'éléments sont à définir dès cette phase d'analyse.

C'est sur la base de l'analyse du fonctionnement du littoral et d'un examen sommaire des enjeux que le choix des méthodes d'analyse et de cartographie des risques doit être effectué. Il convient de ne pas systématiquement proposer la réalisation de modèles dynamiques visant à améliorer la connaissance de l'aléa. Cet outil, parfois nécessaire dans les zones à fort enjeux, peut s'avérer difficile à mettre en œuvre voire inutile dans certains cas. Une analyse pragmatique est donc à effectuer, en considérant les enjeux du territoire étudié et les éléments préalables de connaissance de l'aléa disponibles.

Cette phase d'analyse du fonctionnement du littoral représente un moment clé en termes d'association et de concertation. Elle permet :

- à tous les acteurs de partager une connaissance technique et historique des phénomènes rencontrés et de leur impact sur le territoire. Cette montée en compétence collective est d'autant plus constructive que les bureaux d'études n'auront pas commencé les études d'aléas,
- de mener une analyse partagée avec les collectivités locales de l'état des ouvrages de protection. La circulaire du 8 juillet 2008, relative au contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques, explicite l'inté-

rêt de cette concertation. De plus, l'identification des responsables d'ouvrages, la connaissance de leur dimensionnement ainsi que la qualité de leur surveillance et de leur entretien ont, dans certains cas, un impact sur le règlement du futur PPR.

1.2.3.b - La caractérisation et qualification de l'aléa

Le choix des méthodes retenues lors de l'analyse du fonctionnement du littoral, permet de caractériser et de qualifier l'aléa conformément au chapitre 4.3 du présent guide.

Cette phase a pour objectif de produire et de partager la connaissance des éléments suivants nécessaire à la détermination de l'aléa de référence :

- l'aléa recul du trait de côte : la zone exposée à l'évolution tendancielle à échéance 100 ans et la zone soumise à un événement tempétueux majeur sont délimitées,
- l'aléa migration dunaire : la zone exposée au front de dune à échéance 100 ans et la zone soumise à un événement tempétueux majeur sont définies,
- l'aléa submersion marine : les hauteurs d'eau et la dynamique de submersion sont déterminées. Cette analyse se base sur l'analyse des conséquences d'un événement centennal ou d'un événement historique dès lors que celui-ci est supérieur à l'événement centennal. D'autres scénarios peuvent être étudiés afin de mieux appréhender la dynamique du secteur concerné (submersion fréquente ou extrême par exemple),
- les zones spécifiques telles que :
    - les bandes de précaution : zones immédiatement situées derrière les systèmes de protection sujettes à dissipation d'énergie en cas de surverse ou de rupture,
    - les secteurs soumis à des franchissements par paquets de mer et/ou aux chocs mécaniques des vagues,
- les zones qui ne sont pas directement exposées aux aléas mais où certains aménagements ou activités pourraient aggraver les aléas ou en provoquer de nouveaux.

Sur la base de ces connaissances, une qualification de l'aléa, et sa représentation cartographique, sont réalisées :

- les aléas recul du trait de côte et migration dunaire sont systématiquement qualifiés de « fort » ,
- l'aléa submersion marine est qualifiée de « faible / modéré / fort ou très fort ».

Les règles générales communes à tous les PPR naturels comportent pour les PPR Littoraux les spécificités notables suivantes :

- la manifestation de l'aléa fait parfois apparaître des aléas très forts dont la réalisation implique des dommages immédiats très importants. Par exemple, les zones situées immédiatement derrière un ouvrage de protection sont soumises, en cas de rupture, à des phénomènes de dissipation d'énergie pouvant détruire des habitations.
- les PPRL doivent prendre en compte l'impact actuel et à échéance 100 ans du changement climatique. À ce jour, la détermination des aléas à l'horizon 100 ans se base sur les prévisions du GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), reprises par l'ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique). Cette notion sera donc évolutive en fonction de l'avancée des travaux scientifiques en la matière afin de retenir les dernières données disponibles arrêtées par le ministère.

1.2.3.c - L'analyse des enjeux

L'analyse des enjeux est réalisé conformément au chapitre 5 du présent guide. Elle a pour objectifs de comprendre l'organisation et le fonctionnement du territoire. Cette phase d'étude fait notamment ressortir les différents points de vulnérabilité du territoire. Elle conduit à distinguer les zones non urbanisées, les espaces urbanisés et les centres urbains.
Cette analyse s'achève par la réalisation d'une représentation cartographique des enjeux.

1.2.3.d - L'élaboration du dossier réglementaire

Le dossier réglementaire est réalisé sur la base des connaissances acquises lors des étapes précédentes et de l'application des principes réglementaires généraux fixés par la circulaire 27 juillet 2011, relative à la prise en compte du risque submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux. Cette phase est explicitée au chapitre 4 du présent guide.

Le dossier réglementaire est composé :

- d'une note de présentation ayant pour fonction d'expliquer et de justifier la démarche du PPRL et son contenu,
- d'un zonage réglementaire traduisant de façon cartographique les principes réglementaires issus de l'évaluation des risques et de la concertation,
- d'un règlement précisant les règles qui s'appliquent dans chacune des zones.

1.2.4 - La consultation des services et des collectivités

Le processus d'élaboration des PPR prévoit à l'article R.562-7 du code de l'environnement une consultation des organismes et des personnes publiques concernés par le projet préalablement à l'enquête publique. La consultation consiste à demander formellement un avis sur le projet de PPR.

Les conseils municipaux et les organes délibérants des EPCI, compétents pour l'élaboration des documents d'urbanisme dont le territoire est couvert, en tout ou partie, par le projet de PPRL, sont obligatoirement consultés. Certains organismes ou collectivités sont consultés si le projet de PPR est susceptible de les intéresser, eu égard à leur champ de compétences (conseil général et/ou régional). Les avis de la chambre d'agriculture et du centre national de la propriété forestière sont recueillis lorsque le projet de PPR impacte les usages ou l'exploitation des terrains agricoles ou forestiers.

Les avis des services et des collectivités doivent être rendus dans un délai de deux mois. Passé ce délai, l'avis est réputé favorable. L'ensemble des avis recueillis sont consignés ou annexés au registre de l'enquête publique conformément à l'article R.123-17 du code de l'environnement. Leur absence constitue un vice de procédure de nature à entraîner l'annulation du document.

Il est nécessaire de soumettre à l'enquête publique des documents strictement identiques à ceux soumis à la consultation des collectivités et des services. Une modification des documents suite à la consultation avant l'enquête publique entacherait la procédure d'irrégularité[5].
Si la caractérisation de l'aléa peut se faire sur une échelle large, supra-communale, il est recommandé de réaliser le PPRL ainsi que la phase de consultation et d'enquête publique, commune par commune, en individualisant le dossier de chaque commune.

5 TA Pau, 1er juillet 2008 Mme Françoise X

1.2.5 - L'enquête publique

Après réception des différents avis recueillis dans le cadre de la consultation des services et des collectivités ainsi que de l'avis de l'autorité environnementale lorsqu'il est requis, le projet de PPR est soumis à enquête publique selon l'article R.562-8 du code de l'environnement.
Cette enquête publique relève du régime des « enquêtes relatives aux opérations susceptibles d'affecter l'environnement » tel que défini au sens de l'article L.123-1 et suivants du code de l'environnement.

La composition du dossier soumis est précisée à l' article R.123-8 du code de l'environnement :

- l'évaluation environnementale et son résumé non technique, et, le cas échéant, la décision d'examen au cas par cas de l'autorité environnementale ainsi que l'avis de l'autorité environnementale ;
- en l'absence d'évaluation environnementale, une note de présentation précisant les coordonnées du maître d'ouvrage ou du responsable du plan, l'objet de l'enquête, les caractéristiques les plus importantes du plan et présentant un résumé des principales raisons pour lesquelles, notamment du point de vue de l'environnement le plan soumis à enquête a été retenu ;
- la mention des textes qui régissent l'enquête publique en cause et l'indication de la façon dont cette enquête s'insère dans la procédure administrative relative au PPRL ;
- la ou les décisions pouvant être adoptées au terme de l'enquête et les autorités compétentes pour prendre la décision d'autorisation ou d'approbation ;
- les avis recueillis dans le cadre de la consultation des collectivités et des services ;
- le bilan de la concertation menée et les compte-rendus qui ont été effectués doivent être remis au commissaire enquêteur et joints à la note de présentation du projet de PPRL pour information ;
- la mention de la compatibilité du projet de PPRL avec le Plan de gestion des risques d'inondation [6] (Article L.562-1-VI du code de l'environnement) ;
- le dossier du PPR (détaillé ci-après) :
    - La note de présentation ;
    - le zonage réglementaire ;
    - le règlement ;
    - les éventuelles annexes.

Suite à l'enquête publique et aux conclusions du commissaire enquêteur, le préfet peut modifier le projet afin de tenir compte des observations et des avis recueillis. Les modifications ne peuvent cependant conduire à changer de façon substantielle l'économie générale du projet et ne peuvent correspondre qu'à des modifications ponctuelles, fondées sur des faits concrets et qui ne remettent pas en cause les principes de zonage et de réglementation retenus (exemple : précision altimétrique), sauf à le soumettre de nouveau à l'enquête publique.

6 Valable à partir du 22 décembre 2015

1.2.6 - L'approbation du PPRL

À l'issue de l'enquête publique, le projet de PPRL, éventuellement modifié, est approuvé par arrêté préfectoral. Cet arrêté n'est opposable qu'à l'issue des formalités de publicité et d'affichage définies par le code de l'environnement à l'article R.562-9.
Il est de jurisprudence constante qu'un acte administratif n'est opposable que si celui-ci a fait l'objet d'une publication, notamment au recueil des actes administratifs du département ainsi que dans un journal diffusé dans le département.

Après approbation, le PPRL vaut servitude d'utilité publique. Il doit être annexé au plan local d'urbanisme dans un délai de trois mois à compter de son approbation. À défaut, le préfet peut y procéder d'office.

Enfin, il est conseillé aux services d'archiver l'ensemble du dossier, les pièces officielles mises à l'enquête mais aussi tous les documents annexes : convocations, lettres d'informations, articles de presse, comptes-rendus de réunions publiques, pièces et travaux préparatoires… Ces documents peuvent s'avérer utiles en cas de contentieux ou simplement lors de la révision du PPRL.

Encart 3 : le Jurisques, une ressource essentielle pour l'élaboration des PPR

La Sous-Direction de la Prévention des Risques Majeurs du Ministère de l'Ecologie en 2000, en collaboration avec le Centre d'Études et de Recherches en Droit de l'Environnement, Aménagement et Urbanisme (CERDEAU) a initié un recueil de jurisprudences. Ce recueil offre aujourd'hui une large place aux commentaires de jurisprudences dans un document complet et synthétique : le Jurisques. Véritable ouvrage de référence des services en charge de la prévention des risques naturels, le Jurisques est actualisé chaque année sous l'autorité et le contrôle du Service des Risques Naturels et Hydrauliques du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Énergie.
L'annexe 5.4 reprend un extrait du sommaire du « Jurisques 2013 » concernant la partie relative aux PPR. Ce document est librement consultable et téléchargeable dans son intégralité sur le site *Prim.net* dédié à la prévention des risques naturels majeurs à l'adresse suivante : http://jurisprudence.prim.net/jurisprud2013.html
Ce document a vocation à être actualisé régulièrement (rythme annuel).

Encart 4 : COVADIS

La COVADIS, Commission de Validation des Données pour l'Information Spatialisée, est une commission interministérielle, mise en place par le ministère de l'écologie, l'énergie, du développement durable et de la mer et par le ministère de l'agriculture, de l'alimentation et de la pêche pour **standardiser leurs données géographiques** les plus fréquemment utilisées dans leurs métiers.
Cette standardisation prend la forme de ***géostandards*** que les services doivent appliquer dès qu'ils ont à échanger avec leurs partenaires ou à diffuser sur internet de l'information géographique. Ils sont également communiqués aux collectivités territoriales et autres partenaires des deux ministères. La COVADIS inscrit son action en cohérence avec la directive INSPIRE et avec les standards reconnus.

Le géostandard « Plan de Prévention des Risques » traite de l'élaboration, de l'administration et de la réutilisation des données géographiques de PPRN ou PPRT. Il propose un cadre technique de modélisation et de structuration des données visant à rendre homogènes les données géographiques produites dans le cadre de l'élaboration d'un PPR.
Il répond à la priorité de standardiser les données géoréférençant les zones réglementées des PPR, tout en offrant la possibilité de traiter la carte des zones d'aléas et les enjeux qui ont été croisés au moment de l'analyse du risque.
Les objets « PPR » suivants sont définis par ce géostandard :

- le document PPR,
- la zone réglementée,
- les enjeux,
- la carte d'aléa et ses zones d'aléas,
- l'origine du risque, vue comme un objet géographique générateur de l'aléa.

Le géostandard COVADIS est disponible sur internet à l'adresse suivante : http://www.cnig.gouv.fr/Front/index.-php?RID=152

1.2.7 - L'application anticipée

La procédure d'application anticipée est définie aux articles L.562-2 et R.562-6 du Code de l'environnement. Lorsque le projet de PPRL est suffisamment avancé, le préfet peut, après consultation des maires concernés, rendre certaines dispositions du projet de PPRL immédiatement opposables. Les dispositions ainsi appliquées par anticipation ne peuvent concerner que les aménagements, les exploitations, les constructions et les ouvrages nouveaux définis aux points 1° et 2° de l'article L.562-1 du code de l'environnement.
Le recours à la procédure d'application anticipée du PPRL doit être justifiée par l'urgence de la situation qui est appréciée au regard des caractéristiques du phénomène naturel et/ou par la nécessité de ne pas compromettre l'application ultérieure du PPRL.
Ces dispositions cessent d'être opposables si elles ne sont pas reprises dans le PPRL approuvé.

1.2.8 - La procédure de révision et de modification des PPRL

La procédure et les conditions de révision et de modification du PPRL sont définies aux articles L.562-4-1, R.562-10, R.562-10-1 et R.562-10-2 du code de l'environnement. La circulaire du 28 novembre 2011 relative à la procédure d'élaboration, de révision et de modification des plans de prévention des risques naturels prévisibles vient préciser les modalités de recours à ces procédures.

La révision du PPRL sur tout ou partie du territoire peut être justifiée par une évolution de l'aléa ou de la vulnérabilité du territoire. La procédure et les modalités de révision sont les mêmes que celles ayant conduit à son élaboration initiale : association, concertation, prescription, élaboration, consultation, enquête publique et approbation. Dans le cas d'une révision partielle, l'enquête publique est limitée aux seules communes concernées par la révision.

La procédure de modification du PPRL est une procédure simplifiée ne nécessitant pas d'enquête publique. Le projet de modification et l'exposé de ses motifs seront tout de même mis à la disposition du public dans les mairies concernées pendant un délai d'un mois précédant l'approbation de la modification par le préfet.
La modification d'un PPRL ne peut cependant être utilisée qu'à la condition que la modification ne porte pas atteinte à l'économie générale du PPRL. Elle peut être mise en œuvre dans le cadre de :

- la rectification d'une erreur matérielle,
- la modification d'un élément mineur du règlement ou de la note de présentation,
- la modification du zonage réglementaire du PPRL pour prendre en compte un changement dans les circonstances de fait.

2 - Caractérisation et qualification des différents aléas

2.1 - Analyse générale du fonctionnement du littoral

2.1.1 - Une étude des aléas littoraux en deux phases

En raison d'influences multiples, les caractéristiques des agents météo-marins, la position du rivage et la morphologie côtière fluctuent aux différentes échelles de temps et d'espace. Une bonne connaissance des relations fluctuantes entre les formes littorales et les influences subies est une phase à part entière de toute étude d'aléas des milieux fragiles et mobiles que sont les littoraux. La démarche de toutes études d'aléas se déroule selon deux phases (cf. Illustration 1) :

- l'analyse générale du fonctionnement du littoral : elle a pour objectif d'analyser le fonctionnement du littoral et de décrire les phénomènes pour déterminer les aléas à traiter et les principaux facteurs à l'origine de chaque aléa et définir précisément le bassin d'étude des aléas. Elle apporte les éléments nécessaires au choix des hypothèses à retenir et des méthodologies à mettre en œuvre pour la caractérisation des aléas.. Elle permet une bonne compréhension du fonctionnement du site et d'apporter les éléments nécessaires au choix de(s) l'événement(s) naturel(s) de référence, de la méthodologie de caractérisation et des différentes hypothèses (cf. cahier technique « le fonctionnement du littoral »).
- la caractérisation et la cartographie des aléas : Chaque aléa considéré est caractérisé par des méthodes qui lui sont spécifiques. Néanmoins, l'analyse d'un aléa peut nécessiter préalablement d'avoir analysé le fonctionnement du littoral au regard d'un autre aléa. Tel est le cas lorsque des interactions entre les deux aléas sont identifiées lors de la phase d'analyse préalable du fonctionnement du littoral. Les études relatives à l'évolution du trait de côte seront alors utilisées lors de la caractérisation de l'aléa submersion marine.

L'analyse générale du fonctionnement du littoral, première phase de l'étude d'aléa s'appuie principalement sur la bibliographie existante ainsi que sur des observations de terrain mais peut demander des analyses spécifiques (instrumentation, modélisation, dires d'expert, etc.). Elle comprend les étapes suivantes :

- la description hydro-morphosédimentaire du site : elle a pour objectif d'analyser les transports sédimentaires et les évolutions du littoral qui en résultent, les évolutions de la position du trait de côte et de la morphologie de la frange littorale. Elle s'appuie sur :
  - l'analyse du cadre géomorphologique : types de côtes, caractéristiques géologiques, hydrogéologique et morpho-sédimentaires,
  - les conditions climatiques, météorologiques et hydrodynamiques associées (niveaux marins, houles, etc.),
  - le fonctionnement hydro-sédimentaire : analyse des transits sédimentaires,
  - les ouvrages de protection et les systèmes de protection contre les inondations,
  - l'analyse du fonctionnement hydraulique du site,
- l'approche historique : plusieurs points sont analysés lors de cette phase : l'évolution de la position du trait de côte et de la morphologie de la frange littorale, les événements historiques de submersions marines, l'évolution de l'occupation humaine et de l'implantation des ouvrages de protection. Une analyse chronologique de ces différents points permet d'apporter des éléments de compréhension complémentaires à l'analyse du fonctionnement hydro-sédimentaire.

À l'issue de ces 2 étapes, une synthèse du fonctionnement du littoral, analysant les principaux facteurs à l'origine des aléas littoraux, est à réaliser (cf. 2.1.2). C'est uniquement lors de cette synthèse que le périmètre du bassin d'étude des aléas est définitivement arrêté.

La démarche et le contenu de cette analyse du fonctionnement du littoral est décrite dans le cahier technique *L'analyse du fonctionnement du littoral* (à paraître).

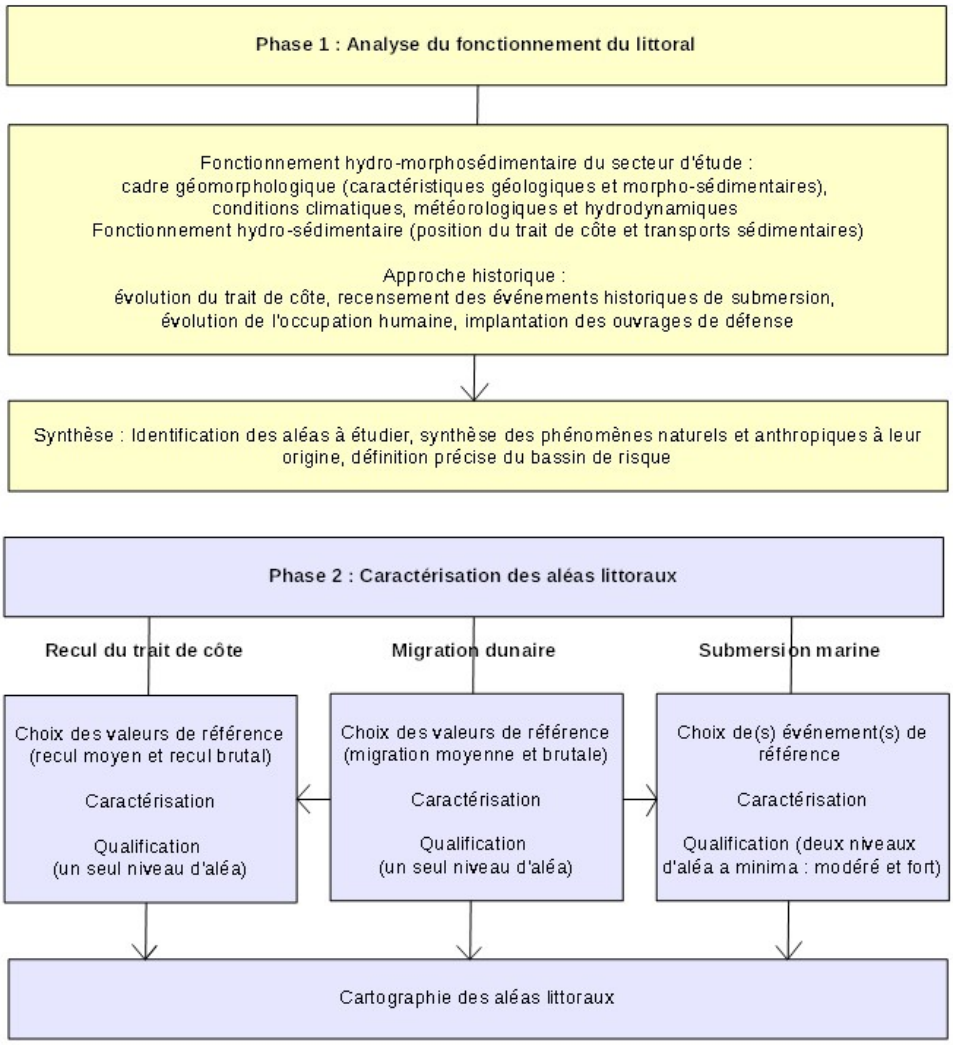


Illustration 1 : Démarche de l'étude des aléas littoraux

2.1.2 - Synthèse de l'analyse du fonctionnement du littoral : identification des facteurs à l'origine des aléas littoraux

L'analyse du fonctionnement du littoral doit permettre de déterminer les aléas à traiter et les principaux facteurs à l'origine de chaque aléa et de définir précisément le bassin d'étude des aléas. Elle apporte les éléments nécessaires au choix des hypothèses à retenir et des méthodologies à mettre en œuvre pour la caractérisation des aléas. À la fin de cette première phase, une fois les aléas à étudier identifiés, il est nécessaire de synthétiser l'ensemble des résultats qui sont directement exploités dans la phase 2 de l'étude d'aléa.

Ainsi, dans la phase d'analyse du fonctionnement du littoral, le niveau d'étude à conduire dépend des analyses attendues en fin de phase 1, décrites ci-dessous, et de la bibliographie existante.

2.1.2.a - Le recul des côtes rocheuses et à falaises

Le recul des côtes rocheuses s'effectue sur des pas de temps relativement longs, généralement pluri-décennaux. Cette dynamique régressive revêt un caractère discontinu dans l'espace et ponctuel dans le temps. Préalablement à la caractérisation de l'aléa recul du trait de côte pour ce type de côte, il apparaît par conséquent nécessaire d'établir une synthèse des analyses effectuées. Cette synthèse aborde les points suivants :

- définition des types de mouvements en présence, écroulement/éboulement ou glissement ;
- recensement des événements significatifs et de leurs caractéristiques ;
- association de la mesure de l'évolution du trait de côte à long terme et de l'inventaire des mouvements ponctuels quel que soit le type de mouvement ;
- analyse du phénomène de recul au regard de l'action combinée des facteurs marins et continentaux ;
- détermination des zones qui ne sont pas directement soumises à l'aléa recul mais où certains aménagements ou activités pourraient l'aggraver ou l'initier (du fait des infiltrations notamment).

2.1.2.b - Le recul des côtes basses meubles et la migration dunaire

Les formes d'accumulation connaissent alternativement des périodes d'engraissement, appelées aussi périodes d'accumulation ou de progradation, et de démaigrissement, ou érosion. Les processus d'évolution de la côte sont continus et entraînent le remodelage du trait de côte à des échelles de temps géologiques, saisonnières (phases d'accrétion et d'érosion) et ponctuelles lors d'événements tempétueux. Pour appréhender l'évolution du trait de côte, il convient d'intégrer ces différents pas de temps pour chacun des processus à l'œuvre. Il convient de rappeler que la mobilité spatiale intrinsèque, « degré de liberté » du littoral, ne doit pas être confondue avec la tendance évolutive à long terme. Une analyse des évolutions à long terme (échelle historique) et à court et moyen terme est donc nécessaire.

La synthèse de l'évolution des côtes basses meubles, nécessaire avant la phase de caractérisation des aléas recul du trait de côte et migration dunaire, consiste en :

- l'analyse de l'évolution du trait de côte à long terme et au cours d'événements ponctuels (analyse des positions successives du trait de côte et du front dunaire le cas échéant) ;
- l'analyse de l'évolution des morphologies associées à l'évolution de la position du trait de côte (cordons naturels, plages…) ;
- l'identification des zones d'accumulations sédimentaires fortement mobiles (flèches, cordons…) ;
- l'analyse des transits sédimentaires en lien avec les facteurs de forçage et des volumes sédimentaires en jeu ;
- la synthèse de la dynamique sédimentaire, y compris l'impact des ouvrages, à l'échelle d'une cellule sédimentaire, et si nécessaire des cellules adjacentes ;
- l'analyse du phénomène de recul au regard de l'action combinée des facteurs marins et anthropiques, visant à l'identification des principaux facteurs à l'origine de l'évolution du trait de côte ;
- l'analyse, au regard des points précédents, de la représentativité des tendances passées par rapport aux tendances futures (impacts des ouvrages, stocks sédimentaires disponibles…) ;
- la détermination des zones qui ne sont pas directement soumises à l'aléa recul mais où certains aménagements ou activités pourraient l'aggraver ou l'initier (cordons naturels végétalisés notamment).

2.1.2.c - La submersion marine

L'analyse des inondations par la mer s'appuie sur la confrontation de trois types de données : (1) les indices ayant trait aux événements passés, (2) les conditions météo-marines, (3) la morphologie des lieux. Une synthèse du phénomène de submersion marine, par l'analyse des différents types d'informations recensées, est nécessaire avant la phase de caractérisation.

Elle consiste à identifier :

- la description du fonctionnement hydraulique du site et du déroulement des submersions (passées ou probables) : points d'entrée et écoulements ;
- par secteur, les modes de submersions historiques : débordement, franchissements par paquets de mer, rupture d'ouvrage ou de structure naturelle ;
- à partir des événements historiques, les phénomènes naturels autres que les niveaux marins hauts (houles, débits de cours d'eau, précipitations, remontée de nappes, etc.) à prendre en compte dans l'événement de référence ;
- la liste des événements historiques susceptibles d'être événements de référence ;
- les événements pouvant si nécessaire être utilisés pour le calage de modèles ;
- les interactions entre recul du trait de côte et submersion marine ;
- la localisation des structures participant à la protection contre la submersion marine et leurs caractéristiques : cordons naturels, cordons anthropisés, ouvrages et leur rôle ;
- la détermination des zones qui ne sont pas directement exposées à la submersion marine mais où certains aménagements ou activités pourraient aggraver l'aléa ou induire une nouvelle zone soumise à aléa (cordons naturels végétalisés ayant un rôle de protection contre la submersion notamment).

2.1.2.d - Résultats attendus de la phase 1

Les résultats obtenus après la phase d'analyse générale du fonctionnement du littoral par les différentes investigations réalisées sont consignés dans un rapport d'étude. Il récapitule :

- la liste des données recensées, les contacts pris, les sites internet consultés, etc.,
- la bibliographie comprenant le recensement exhaustif des études menées sur le site auparavant,
- la synthèse des principaux résultats de la bibliographie,
- les analyses complémentaires menées.

Un cahier de cartes de synthèse (à des échelles du 1/10 000 ou 1/100 000) peut être établi. Il comprend :

- les cartes anciennes recensées,
- une carte géologique,
- une carte identifiant l'ensemble des sédiments meubles mobilisables à partir des cartes géologiques et des cartes anciennes,
- une carte des phénomènes naturels : principales directions de propagation des houles, zones fortement exposées à la houle, principales zones soumises aux franchissements, zones basses (superposition topographie/niveau marin de référence), localisation et cote des points bas,
- une carte de l'évolution du trait de côte : positions successives, dates d'implantation des ouvrages, sens du transit littoral, risque de rupture des cordons naturels,
- une carte des ouvrages et structures de protection : localisation des ouvrages, type d'ouvrage,
- une carte de synthèse des événements historiques : localisation des zones inondées par événements, des principaux dégâts sur les ouvrages, des brèches historiques, des principaux reculs ;
- une carte de synthèse des zones qui ne sont pas directement soumises aux aléas mais où certains aménagements ou activités pourraient aggraver les aléas ou en initier de nouveaux.

La note de présentation du PPRL doit synthétiser la méthode d'élaboration du PPRL et présente donc les phénomènes naturels connus et les principales conclusions de l'analyse générale du fonctionnement du littoral.

2.1.2.e - Articulation des phases 1 et 2

L'étude des aléas littoraux menée dans le cadre d'un PPRL doit comprendre l'analyse du fonctionnement du littoral et la caractérisation des aléas. Le passage entre les phases 1 et 2 doit être marqué par un point d'arrêt validant les choix faits à la lumière des premiers résultats (aléas à étudier, méthodologies de caractérisation des aléas, phénomènes naturels à prendre en compte…). Le choix des méthodes de caractérisation des aléas ne peut en effet être complètement défini sans une analyse du fonctionnement du site.

Ceci peut nécessiter dans certains cas, lorsque le site est mal connu, de découpler les deux phases de l'étude. Une étude des aléas à l'échelle régionale peut apporter des premiers éléments pour la phase 1, permettant d'avoir de premières idées sur les méthodes les plus appropriées et de préciser le cahier des charges d'une seconde étude. La phase 2 de caractérisation des aléas ne pourrait cependant être envisagée seule. La phase 1 apporte des éléments de compréhension du site, des informations sur les événements passés utiles lors des phases de concertation pour l'appropriation de la phase 2. Un approfondissement des éléments existants de phase 1 doit donc être réalisé dans la deuxième étude à l'échelle du bassin d'étude des aléas lorsqu'un découpage en deux études successives est envisagé.

2.2 - Aléa recul du trait de côte (érosion)

La caractérisation de l'aléa recul du trait de côte repose sur la synthèse de l'évolution des côtes (cf. cahier technique *L'analyse du fonctionnement du littoral* DGPR, à paraître). L'analyse qualitative de l'évolution du trait de côte réalisée et les positions successives du trait de côte identifiées sont exploitées lors de cette phase pour réaliser par secteur de comportement homogène une analyse quantitative permettant notamment de déterminer le taux moyen annuel de recul.

2.2.1 - Définition du recul du trait de côte

Le recul du trait de côte est le déplacement vers l'intérieur des terres de la limite entre le domaine marin et le domaine continental. Généralement, c'est la conséquence d'une perte de matériaux sous l'effet de l'érosion marine, érosion naturelle induite par les forces marines, combinée parfois à des actions continentales, ou d'une érosion générée ou accélérée par l'homme (sur-fréquentation, extraction, aménagements et ouvrages de protection, urbanisation proche du littoral entraînant des ruissellements de surface et la présence de réseaux, etc.).

L'érosion est une perte de sédiments pouvant entraîner un recul du trait de côte ou un abaissement de l'estran ou de la plage.

Les côtes basses meubles ainsi que les côtes à falaises peuvent reculer. Les côtes basses meubles se caractérisent cependant par une mobilité permanente donnant au trait de côte une géométrie variable, pouvant se caractériser par des phases d'avancée et de recul. Les côtes à falaises ne peuvent que reculer. Leur recul est souvent plus complexe à appréhender du fait de la combinaison des actions continentales (infiltration, ruissellement...) en haut de falaise et des actions directes de la mer.

Illustration 2 : Recul du trait de côte dans le sud Finistère (Photo : DDTM 29 - UPR)

Le recul du trait de côte, tel qu'il est défini dans ce guide, correspond à une évolution sur le long terme du trait de côte, observable à des échelles de plusieurs décennies, consécutive à une tendance à l'érosion. L'érosion peut aussi être observée de manière ponctuelle après un événement tempétueux.

2.2.2 - Choix des valeurs de référence

L'évolution du trait de côte est très variable dans le temps, pouvant résulter d'une combinaison entre phases de régression et d'accrétion. L'aléa recul du trait de côte est un aléa étudié à long terme. Cependant les évolutions ponctuelles peuvent être non négligeables et doivent également être étudiées. Ainsi, l'étude du recul du trait de côte doit être réalisée à différentes échelles temporelles.

2.2.2.a - Détermination du taux moyen de recul annuel Tx

1 Généralités

La détermination de l'évolution du littoral à long terme se base sur l'analyse des tendances passées. L'approche historique permet généralement une bonne connaissance des évolutions du trait de côte sur les 50 ou 60 dernières années. De cette analyse peut être déterminé le taux moyen annuel de recul du trait de côte exprimé en mètre par an.

La connaissance des évolutions sur plusieurs dizaines d'années passées autorise une projection des tendances passées sur les 100 prochaines années dans des conditions environnementales considérées comme invariantes dans le temps.

Cette analyse se base sur les traits de côte identifiés (lors de la phase d'étude du fonctionnement du littoral) et pouvant être comparés (indicateurs de trait de côte identiques ou assimilables). Plusieurs méthodes permettent de déterminer le taux moyen de recul annuel à partir de ces traits de côte (cf. Encart 5). La détermination d'un taux moyen annuel de recul repose sur l'hypothèse que le recul du trait de côte est linéaire dans le temps.

Une attention particulière est à apporter aux incertitudes associées à la détermination de la position d'un trait de côte projeté. Ces incertitudes sont liées à :

- la position des traits de côte utilisés, liée aux techniques de levé mises en œuvre et à la source de l'information (orthophotographies, levés terrain, résolution et qualité du document source…),
- la difficulté de s'assurer que les différents traits de côte disponibles représentent le même objet (cf. cahier technique sur le fonctionnement du littoral),
- la représentativité pour les tendances futures du taux de recul retenu,
- la projection réalisée (cf. Encart 5).

Il est fortement recommandé de déterminer les incertitudes liées à la source de l'information utilisée et d'indiquer l'intervalle de confiance lié à l'extrapolation sur le document cartographique. Ces incertitudes peuvent être prises en compte sous la forme d'un recul supplémentaire défini par l'incertitude liée à la donnée de base et/ou la borne supérieure de l'intervalle de confiance de la projection, si l'analyse des données de base le juge nécessaire.

Encart 5 : Détermination des évolutions historiques du rivage. Définition du taux d'évolution annuel (Tx) : calcul et intervalle de confiance associé (CETE Méditerranée, Aix-Marseille Université - CEREGE)

Les évolutions historiques sont déterminées à partir des différentes positions du trait de côte recensées (cf. 2.1.2.b). Pour pouvoir être comparés et constituer un échantillon homogène de données, les levés de traits de côte doivent représenter un même objet géographique.

La période d'observation des différents traits de côte utilisés pour définir l'évolution historique doit être pluri-décennale. Lorsqu'une tendance long terme se dessine, le trait de côte n'en est pas moins affecté par des évolutions (recul/avancée) qui se situent autour d'une position moyenne (cf. Illustration 3). Si la période d'observation de l'évolution du trait de côte est trop courte au regard de la variabilité à court terme (décennie), ou si la

tendance long terme est peu marquée au regard des variations à court terme, les évolutions autour des positions moyennes sont difficilement perceptibles.

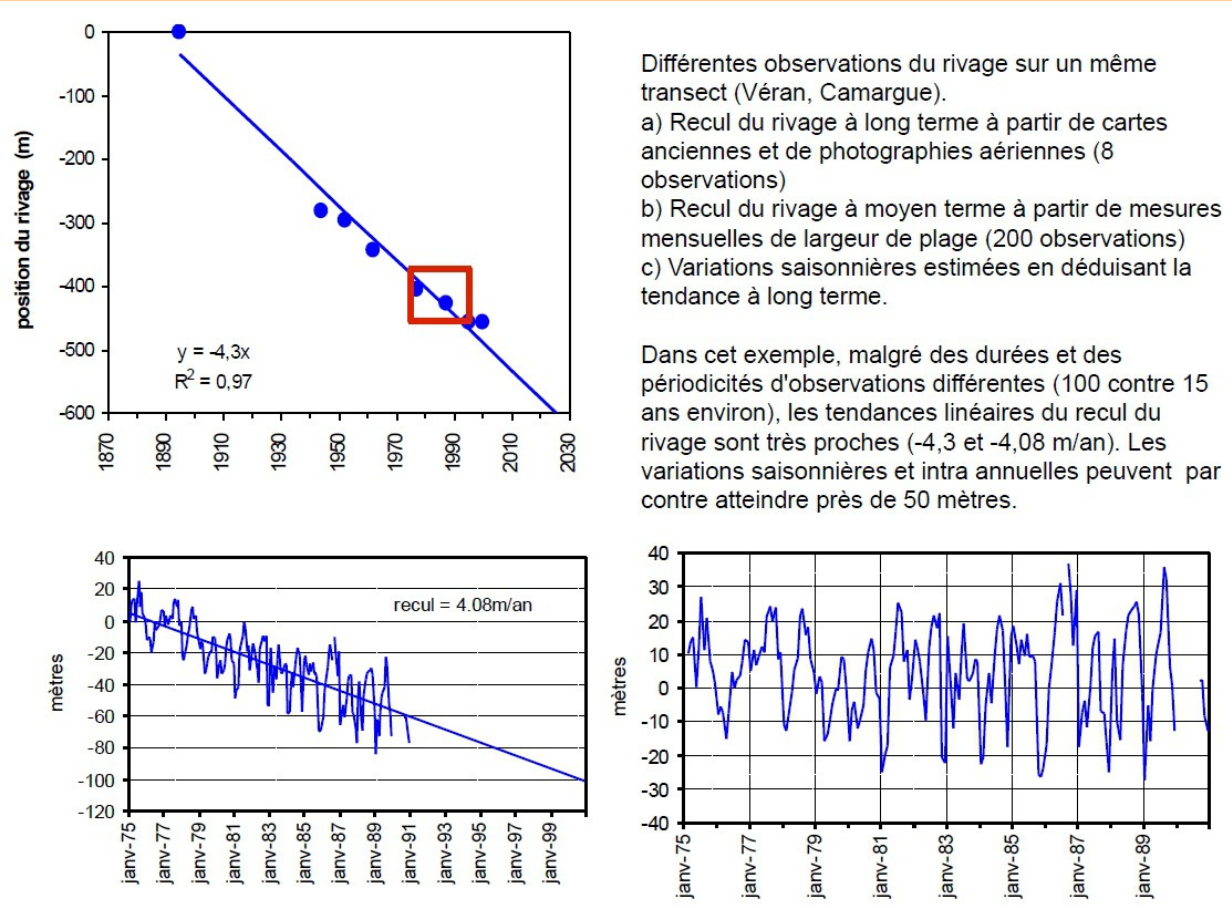


Illustration 3 : Représentation schématique (idéalisée) du recul du trait de côte sur le long terme avec une composante tendancielle et une composante à court terme (Source : CEREGE)

Dans cette illustration idéalisée, la pente de la droite « position à long terme » donne la valeur de l'évolution moyenne du trait de côte que l'on notera **Tx** exprimé en m/an ou en cm/an.

Les variations historiques du rivage sont déterminées à partir de transects, appelés aussi traces, globalement perpendiculaires à la côte et espacées longitudinalement de manière régulière (cf. Illustration 4). La détermination des transects est déterminante sur les résultats et elle doit être une représentation d'un linéaire de côte dont le fonctionnement est homogène.

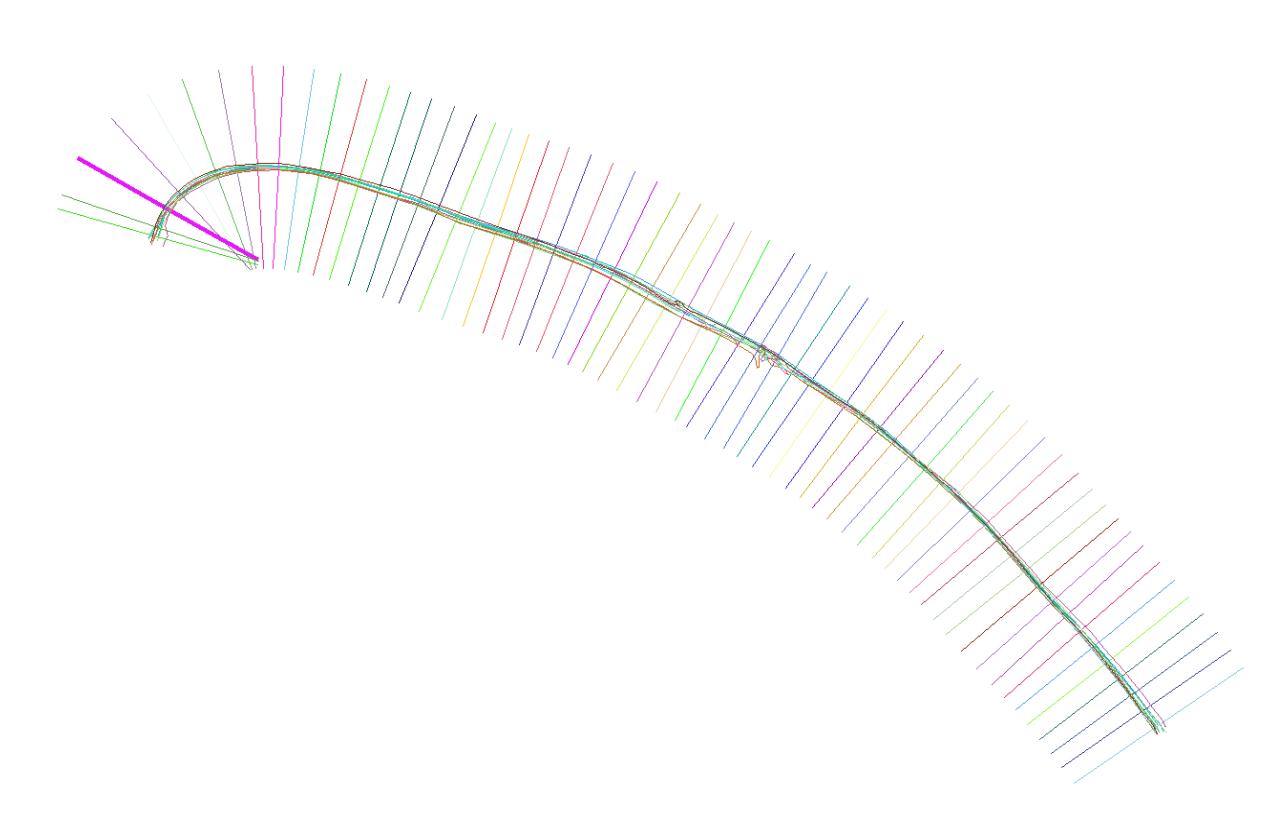


Illustration 4 : Positions historiques du trait de côte et transects

Plusieurs lois statistiques peuvent être mises en œuvre pour déterminer l'évolution historique du rivage à partir des distances sur un même transect entre les différents traits de côte successifs disponibles. Lors de la détermination des extrapolations des tendances passées, les incertitudes et les intervalles de confiance associés à ces extrapolations doivent être estimés. Le tableau suivant établit une synthèse des lois les plus couramment rencontrées dans la littérature scientifique en ajoutant leurs avantages et inconvénients. Le tableau précise aussi si la loi repose sur une hypothèse de tendance linéaire, si elle permet la détermination de l'intervalle de confiance associé et si elle intègre les incertitudes liées aux données de base.

Nom	**Principes**	**Avantages**	**Inconvénient**	**Hypothèse de tendance linéaire**	**Intervalles de confiance**	**Incertitudes des données de base**
Régression linéaire simple aux moindres carrés (Ordinary Least Squares - OLS)	Méthode d'ajustement de tous les points sur une tendance linéaire avec minimisation de la somme des carrés des écarts entre les valeurs prédites et observées.	Mise en œuvre très simple et connue. Permet de fournir des tests statistiques.	Sensible aux points extrêmes (horsains) .	Oui	Oui	Non
Taux des points extrêmes (End Point rate - EPR)	Le taux est calculé à partir de la valeur la plus récente et la valeur la plus ancienne.	Simple à mettre en œuvre.	Faiblesse de l'information initiale.	Oui	Non	Non

Moyenne des taux (Average of rate - AOR)	Calcul du taux sur tous les couples de points exceptés sur ceux trop proches en temps (critère à fournir).	Permet de filtrer les erreurs de mesure ou les variations à court terme.	Le choix du critère de temps minimum entraine une forte sensibilité.	Oui	Non	Non
Description de longueur minimale (Minimum description Length - MDL)	Méthode cherchant à ajuster la meilleure forme de polynômes. Des calculs peuvent ensuite être conduits sur différentes périodes.	Permet d'estimer si la tendance n'est pas linéaire. Des dates de changement de tendance peuvent être identifiées	Forte influence des données récentes, projections à proscrire, analyse experte des résultats à mener.	Non	Non	Non
Méthode du Jackknife (Jackknifin g - JK)	Utilise la méthode de « Régression linéaire simple aux moindres carrés » avec un ré-échantillonnage enlevant 1 valeur observée. Les différents taux sont ensuite moyennés.	Diminue l'influence des points extrêmes et des valeurs proches.		Oui	Oui	Non
Régression linéaire aux moindres carrés repondérée Reweighte d Least Squares - RLS)	Méthode en deux étapes, la première identifie par régression linéaire simple (OLS) les points extrêmes (horsains). Les valeurs observées au delà d'un écart-type (σ) de +/- 1 sont supprimées. La régression linéaire simple est ensuite appliquée à ce nouvel échantillon.	Permet d'écarter des points extrêmes (horsains).	Diminue le nombre de points de l'échantillon. Mieux adaptée à un grand nombre de mesures.	Oui	Oui	Non
Régression aux moindres carrés ponderée (Weighted Least Squares - WLS)	L'objectif de la méthode est d'intégrer l'incertitude des données historiques. La régression linéaire aux moindres carrés est donc utilisée en pondérant chaque valeur observée par un poids égal à $1/\sigma^2$.	Prend en compte l'incertitude des données historiques.	Sensible aux points extrêmes (horsains).	Oui	Oui	Oui

Illustration 5 : Synthèse des méthodes de détermination du taux de recul annuel (d'après Genz et al., 2007)

D'autres méthodes, moins utilisées, existent (Genz *et al*, 2007).

La plupart des lois se base sur une tendance linéaire. Pour vérifier cette hypothèse, il est préconisé de :
1. Tester différentes lois de tendances linéaires afin de voir s'il y a accord entre les résultats pour réaliser ensuite une analyse experte ;
2. Toujours fournir les intervalles de confiance au moins à 70% afin de voir si la durée des valeurs observées, l'hétérogénéité du jeu de données, etc., permettent de conclure que cette approche est correcte ;
3. Tester la loi polynomiale pour trouver des possibles changements de tendance et si c'est le cas :
   - Faire la même démarche sur chacune des périodes fournies, en particulier lors de la mise en place d'ouvrages afin de déterminer et de cartographier :
     - la tendance historique « naturelle » avant la cassure de tendance,

- la tendance récente après la cassure.
- Le choix de la position finale doit s'appuyer sur une analyse experte entre les deux tendances.

Suivant les cas, certaines lois peuvent ainsi être privilégiées ou abandonnées. Des outils de type MobiTC, développé par le CETE Méditerranée, ou DSAS - Digital Shoreline Analysis System -, extension de l'outil ArcGIS (Thieler, E.R. *et al*, 2009) permettent d'automatiser le calcul du taux d'évolution du trait de côte et des intervalles de confiance associés et de mettre en œuvre certaines de ces lois de manière simplifiée. Les points extrêmes au regard de la tendance majeure d'évolution (horsains) donnent des indications sur les évolutions à court terme, pouvant être utiles dans le cadre de la détermination du recul ponctuel associé à une tempête (Lmax).

Toutefois, l'analyse de l'évolution du trait de côte ne peut se restreindre à une analyse diachronique de la position du trait de côte et à une extrapolation moyenne de la position du trait de côte à partir d'observations passées. Ce mode de calcul ne peut pas rendre compte de l'ensemble des évolutions morphologiques du littoral : évolution du profil, analyse des stocks sédimentaires et des transits sédimentaires (cf. Encart 6 et cahier technique) au sein des cellules hydro-sédimentaires qui jouent un rôle sur l'évolution de l'estran et par voie de conséquence sur l'érosion et la mobilité du trait de côte… Ainsi a minima, l'ensemble des facteurs influençant l'évolution du trait de côte sont à recenser et une analyse qualitative des transits doit être réalisée. En particulier, si les tendances passées ne sont pas représentatives des tendances à venir (implantation d'un ouvrage, disparition d'un stock sédimentaire, discontinuité géologique – notamment atteinte de zones rocheuses, etc.) et si un recul plus important peut être attendu, une modulation du taux d'évolution passée Tx peut être proposée. En particulier, dans certains cas, le taux moyen de recul peut être révisé à la hausse pour tenir compte d'une évolution non-linéaire pouvant être due à l'effet d'aménagements lourds (épis…) ou à une modification importante des apports en sédiments (constructions de barrages sur un cours d'eau, extraction de sédiments**…**). Par ailleurs, la probabilité des évolutions futures est également à analyser au regard de la géologie. Les socles rocheux, pouvant contraindre les évolutions, sont ainsi à identifier. Cette modulation et sa valeur doivent être dûment justifiées.

Pour les côtes basses, la morphologie associée à l'évolution de la position du trait de côte doit être appréciée (maintien ou évolution des formes littorales, en particulier des cordons naturels jouant un rôle de protection contre la submersion marine et des barres sous-marines d'avant-côte jouant un rôle d'atténuation de la houle, « durée de vie » des cordons dunaires).

Encart 6 : Exemple d'étude des transits sédimentaires : Étude de connaissance des phénomènes d'érosion sur le littoral vendéen

Une étude générale de l'évolution du trait de côte a été menée par la DDE de Vendée en 2007 dans l'objectif d'identifier des stratégies de gestion possibles en fonction de l'évolution du trait de côte. Une étude des tendances passées et une estimation des tendances futures à partir de l'analyse des transits sédimentaires ont été réalisées.

L'ensemble du littoral vendéen a été découpé en sept unités sédimentaires indépendantes du point de vue du transit littoral, puis en 22 sous-unités définies sur des critères d'homogénéité des caractéristiques bathymétriques et d'exposition aux houles. Seul le transport de sédiments non cohésifs a été abordé.

La quantification des mouvements sédimentaires longitudinaux sur la côte vendéenne a été réalisée par la mise en œuvre d'une modélisation numérique en deux étapes (cf. Illustration 6) :
- modélisation de la propagation de la houle du large à la côte,
- modélisation du transport sédimentaire sur chacune des 22 sous unités.

L'objectif est de déterminer le transport sédimentaire « moyen » résultant de l'action des houles.

Les conditions de la houle au large sont issues de la base de données numérique ANEMOC sur la période 1979 à 2001. La houle est propagée à la côte avec le modèle MIKE 21 SW, pour un niveau marin constant, permettant de connaître les caractéristiques du champ de houle au pas de temps horaire sur l'ensemble des 22 sous-unités qui couvrent l'ensemble du littoral de la Vendée. Sur chacun de ces 22 segments le climat de houle à la côte est ensuite extrait et utilisé pour les calculs de transport sédimentaire.

Le module LITDRIFT du modèle mathématique LITPACK permet de modéliser numériquement le transport sédimentaire (cf. encart dans le cahier technique relatif au fonctionnement du littoral). Dans ce module, les courants de marée ne sont pas intégrés. Ce module permet de calculer la transformation de la houle à travers la zone de déferlement, le courant de houle et le transport littoral pour une plage uniforme (hypothèse simplificatrice).

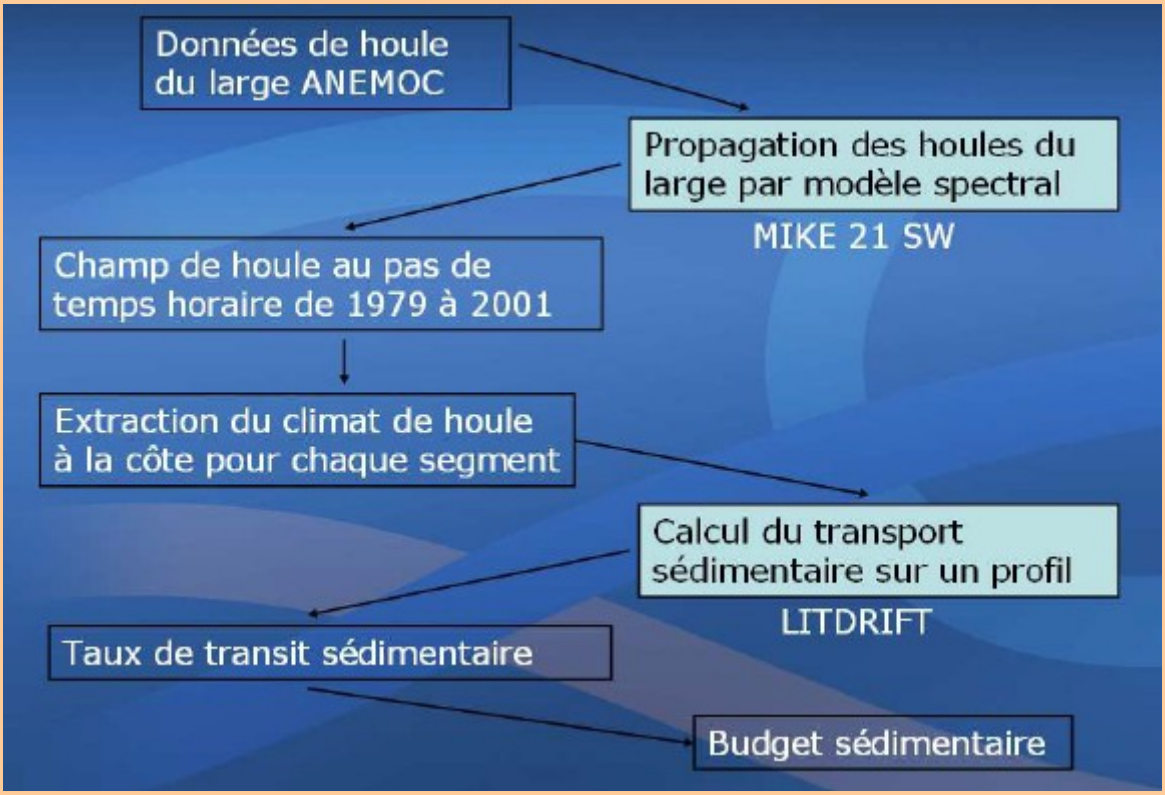


Illustration 6 : Méthodologie d'analyse des transports sédimentaires et outils de modélisation numérique utilisés (Source : DHI)

Les données d'entrée du module sont les « climats de houle » proches de la côte, les profils de plage et la granulométrie.
- Les climats de houle sont extraits pour chaque sous-unité du modèle de propagation MIKE 21 SW et analysés par traitement statistique, les données horaires sur 21 ans étant ramenées sur une année qui rend compte statistiquement des fréquences des événements.
- Pour chaque sous-unité, un profil de plage représentatif, du haut de plage jusqu'à des profondeurs maximales de 15 à 10 m CM, est élaboré sur la base des levés topographiques, bathymétriques et cartes existants.
- Une granulométrie caractéristique (d50) à 0,25 mm a été retenue pour l'ensemble des sous-unités.

Les capacités de transport net (résultante de toutes les contributions de transport pondérées par leur fréquence d'occurrence) et les capacités de transport brut (somme des contributions) selon la variabilité de l'orientation de la côte tout au long de la sous-unité sont obtenues par ces simulations.

Un exemple de résultat obtenu pour le transport sédimentaire net sur l'unité sédimentaire « Fromentine à Saint-Gilles-Croix-de-Vie » est fourni en illustration 7. Sont représentées sur le trait de côte l'évolution pour les plages segment par segment (érosion/stabilité/accrétion) et la nature du trait de côte (rocheux ou artificiel) non soumis à une mobilité du trait de côte.

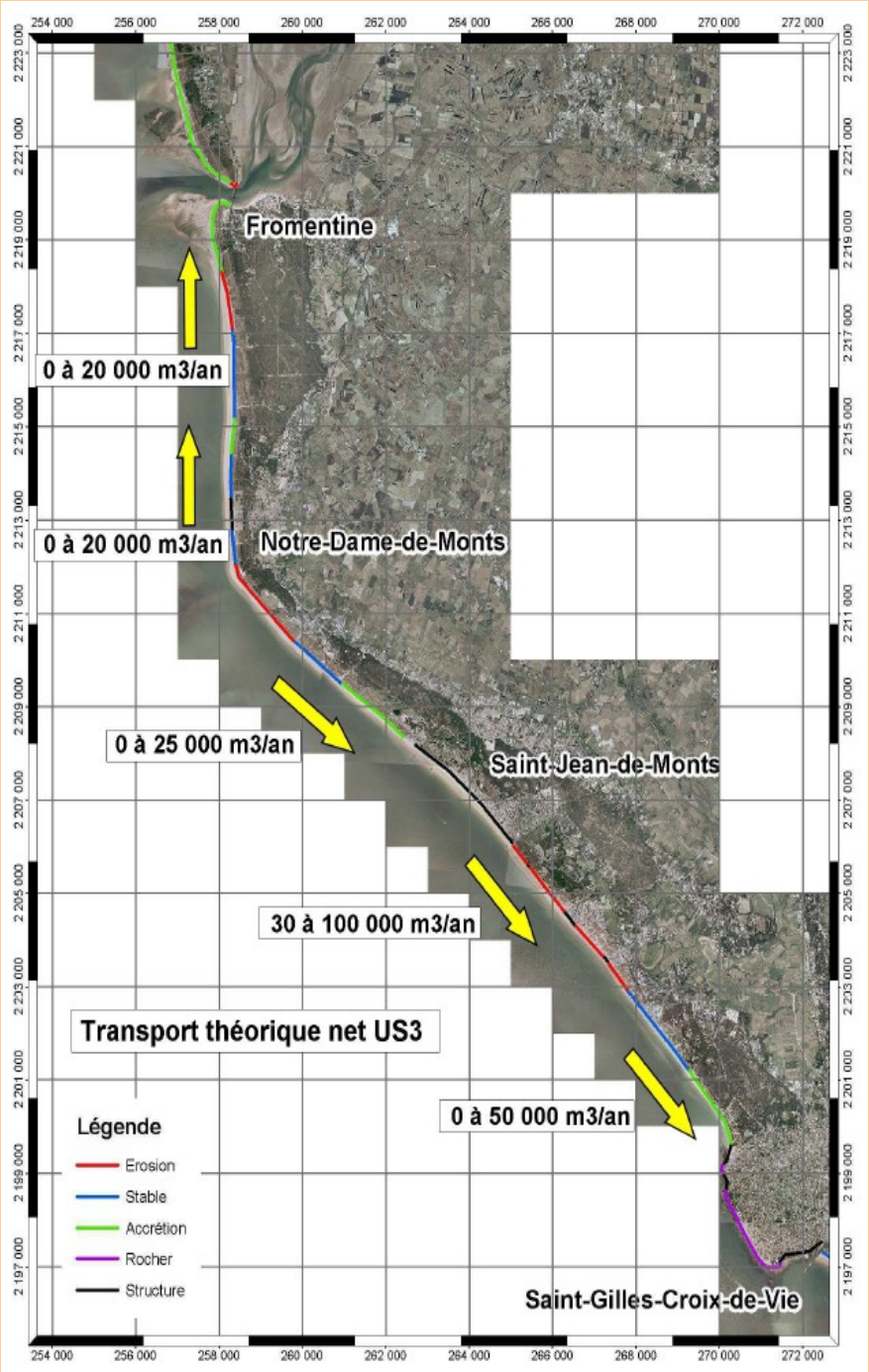


Illustration 7 : Dérive littorale nette sur l'ensemble de l'unité sédimentaire Fromentine à Saint-Gilles-Croix-de-Vie (valeurs du transit sédimentaire net par sous-unité) (Source : DHI)

2 Côtes basses meubles protégées

Un ouvrage de protection côtier est une structure côtière construite et dimensionnée qui répond à une vocation initiale de fixation du trait de côte ou de soutènement des terres, de lutte contre l'érosion, de réduction des franchissements, de dissipation de l'énergie de la houle ou d'obstacle à l'écoulement, sans que ces fonctions soient exclusives : un ouvrage de protection peut recouvrir plusieurs de ces fonctions en même temps. Ainsi plusieurs types d'ouvrages (perré, mur/soutènement, épi, brise-lames, digue) peuvent avoir un rôle de lutte contre le recul localisé du trait de côte.

Ces ouvrages ne permettent pas de contrer les phénomènes d'érosion dans la durée mais permettent souvent uniquement de fixer le trait de côte temporairement ou de limiter ses fluctuations. Un littoral dont la ligne de rivage est en apparence fixée peut ainsi être soumis à d'autres phénomènes d'érosion pouvant se traduire par un abaissement du profil, des affouillements en pied d'ouvrages, etc. Ainsi, une zone située derrière un trait de côte artificialisé reste une zone potentiellement sujette à l'érosion et le cas échéant aux inondations.

En présence d'ouvrages de protection, la méthode de détermination du taux de recul annuel Tx est à adapter dès lors que ceux-ci peuvent jouer un rôle sur le long terme.

Le trait de côte peut être fixé selon 2 schémas :

- l'ouvrage s'est substitué à la morphologie pré-existante. A marée haute, le rivage n'existe plus et l'ouvrage est en contact direct avec la mer (pas de plage aérienne) (cf. Illustration 8). Dans ce cas, le trait de côte est souvent représenté par la façade maritime de l'ouvrage (cas d'un perré).
- l'ouvrage et la plage aérienne (sables ou galets) coexistent. Le trait de côte est en partie délimité par l'ouvrage et le haut de plage (cf. Illustration 9). Le trait de côte est dit « fixé » si la plage aérienne ne connaît pas d'évolution sur la période de référence passée (Exemple : perré, épis ou brise-lames, protections dunaires, etc.).

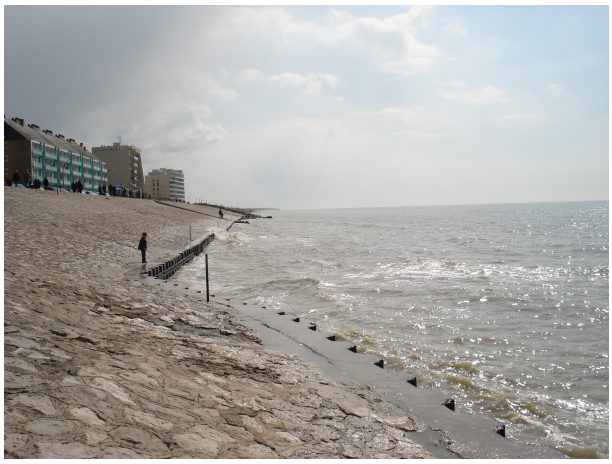


*Illustration 8 **:** Perré à Wimereux (62) s'étant substitué au trait de côte (Photo : CETMEF)*

*Illustration 9 **:** Brises-lames à Valras (34) ne se substituant pas au trait de côte (Photo : DREAL LR)*

En conséquence, les ouvrages de protection doivent être pris en compte de la façon suivante :

- pour les ouvrages s'étant substitué au trait de côte, deux cas peuvent se présenter :
    - l'ouvrage assure la protection d'une partie d'une zone géomorphologique homogène et l'évolution de la zone protégée serait de même type que celle des zones adjacentes en absence d'ouvrage. Dans ce cas, la zone soumise à aléa est déterminée par rapport à l'évolution des zones naturelles non protégées adjacentes où la dynamique érosive demeure active (cf. Encart 7). En effet, le recul des zones contiguës à la zone protégée conduira à un contournement de l'ouvrage de protection. L'ouvrage procure ainsi une protection pendant une durée limitée dans le temps, la protection devenant de plus en plus difficile à assurer au fur et à mesure du recul des zones adjacentes. Lorsque cette protection ne pourra plus être assurée, un recul « accéléré » au droit des zones initialement protégées conduira à un réalignement du trait de côte.
      Dans ce cas, la zone soumise au recul est définie par une définition du taux de recul, de la projection et du recul ponctuel de chaque côté de l'ouvrage puis en joignant les deux extrémités des zones adjacentes.
    - l'ouvrage assure la protection de la totalité d'une zone géomorphologique homogène (zone basse encadrée par deux caps rocheux par exemple). Il n'est dans ce cas pas possible de déterminer un taux moyen annuel de recul. La manifestation de l'érosion ne se traduira alors pas par un recul du trait de côte mais par un abaissement de l'estran et une modification de la bathymétrie des fonds au droit de l'ouvrage de fixation du trait de côte pouvant cependant remettre en cause la pérennité de l'ouvrage.
        - Si les arguments sont apportés que l'ouvrage, de par sa taille, ses caractéristiques, son implantation et son mode de gestion permet d'assurer cette fixation et que les zones adjacentes sont soumises à une évolution négligeable, il peut être considéré que la portion de linéaire côtier est fixée sur le long terme. La zone soumise au recul du trait de côte est définie par la seule application du recul ponctuel dans la caractérisation de l'aléa (cf. infra).
        - Si ces arguments ne peuvent être apportés, une analyse à dires d'expert est mise en œuvre pour définir la valeur du recul estimé à échéance 100 ans. Le recul ponctuel est dans ce cas également pris en compte pour définir la zone soumise à aléa.

- pour les ouvrages luttant contre l'érosion sans fixer le trait de côte (épis, brise-lames…) avec présence de plage aérienne, si les tendances observées pendant la période protégée sont bien connues et représentatives des évolutions à venir, l'évolution passée qui est utilisée pour l'extrapolation à 100 ans est l'évolution sur la période d'existence des ouvrages. Il faut cependant bien veiller à ce que les ouvrages ne puissent pas être contournés (dimensionnement n'étant plus adaptés pour capter une partie du transit sédimentaire). Si la projection à 100 ans conduit, en application du taux de recul du trait de côte calculé, à la disparition de la

plage, il convient d'appliquer une analyse identique à celle présentée pour les ouvrages sans présence de plage aérienne (cf. cas précédent).

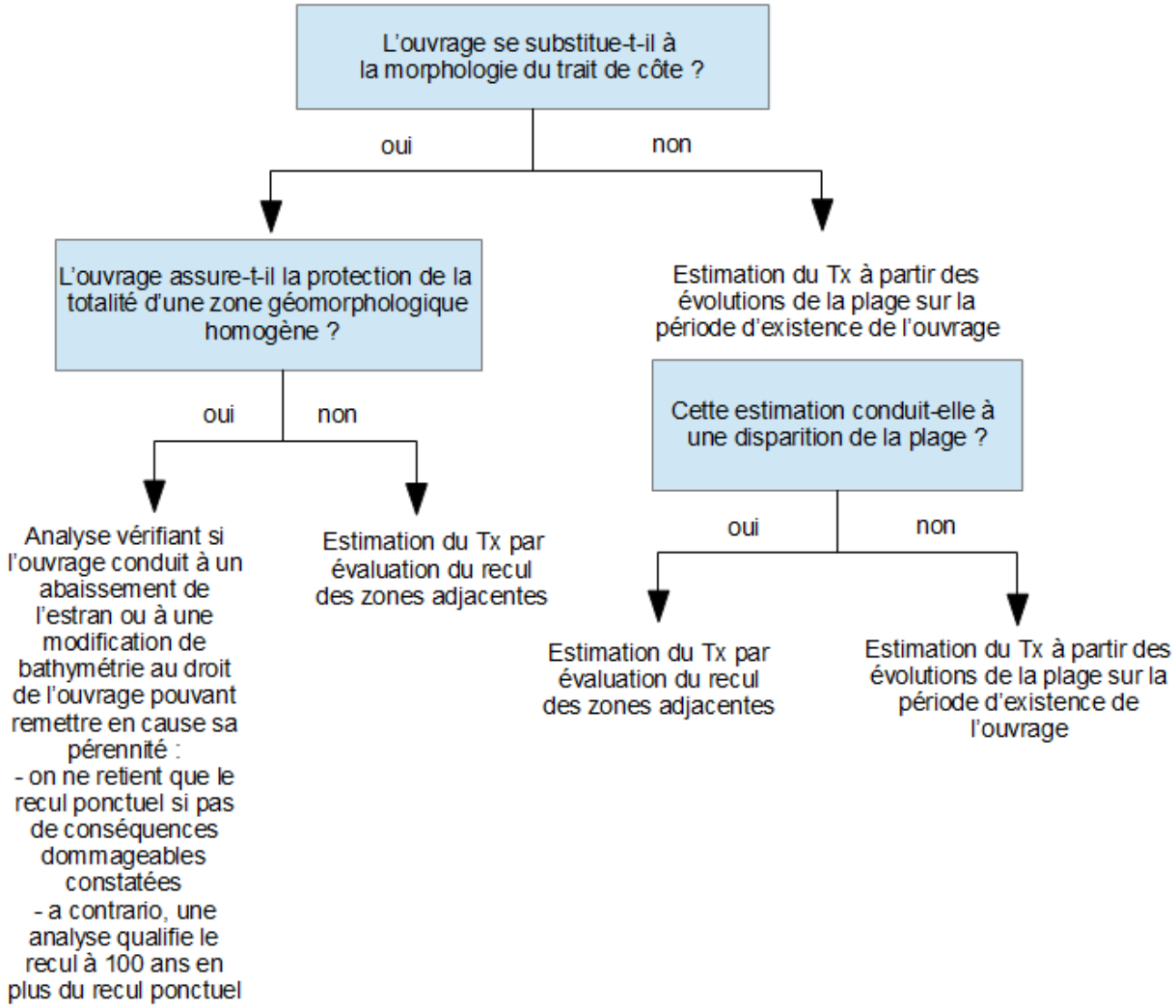


*Illustration 10 **:** Estimation du taux moyen de recul annuel en présence d'ouvrages de protection*

Encart 7 : Front urbain fixé par un ouvrage longitudinal (perré) : Exemple de Lacanau (BRGM)

Sur le littoral sableux aquitain, l'évolution du trait de côte a été étudiée sur une longue période dans le cadre de l'Observatoire de la Côte Aquitaine. Les traits de côte utilisés pour la période récente (1966 à 2009) correspondent au pied de dune. Ils ont été cartographiés avec les méthodes suivantes :
- Photo-interprétation de photographies aériennes (1966, 1985, 1998, 2000 et 2009),
- Levés DGPS (2006),
- Classification radiométrique d'images satellite Formosat 2 (2007, 2008 et 2009).

Des profils topographiques perpendiculaires au trait de côte, levés régulièrement depuis les années 1980 sur des stations de référence, permettent de vérifier que les traits de côte sont convenablement positionnés. Les incertitudes de positionnement du trait de côte inhérentes aux sources (photographies, images satellites) sont de l'ordre de 10 m et sont parfois d'un ordre de grandeur supérieur à l'évolution réelle entre deux levés (cf. Illustration 11).

L'outil d'analyse DSAS (*Digital Shoreline Analysis*) disponible sous ArcGIS (®ESRI) a été utilisé pour calculer, tous les 100 m, les distances d'avancée ou de recul entre les différents traits de côte (cf. Illustration 11). Une ligne de base (ici située côté mer) permet de déterminer le long des transects les distances des différents traits de côte en chaque point d'intersection.

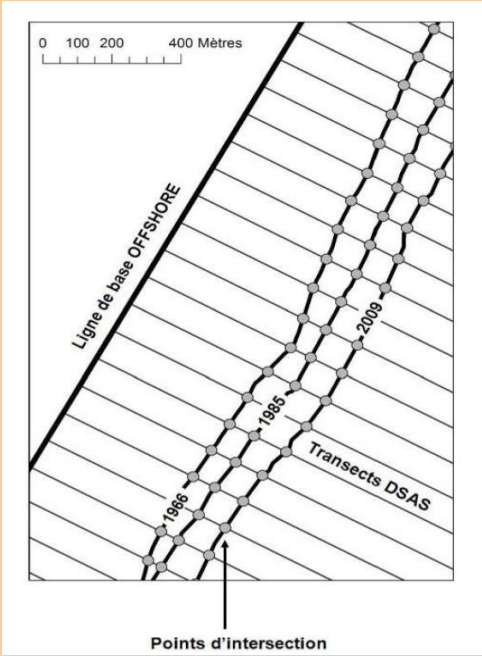


Illustration 11 : Exemple de traits de côte sur la côte Aquitaine (à gauche) et illustration du calcul DSAS (à droite) (D'après BRGM, Aubié et al., 2011)

De la Pointe de Grave, au nord, à Anglet, au sud, les vitesses d'évolution du trait de côte (avancées ou reculs exprimés en m/an) ont été calculées sur la période 1966-2009. Sur les 238 km de côte sableuse, près de 25 % présentent une vitesse moyenne de recul du trait de côte supérieure à 1 m/an. Ces vitesses atteignent localement 6 m/an. Une identification des tronçons de caractéristiques homogènes est ensuite réalisée, calée sur les cellules et sous-cellules sédimentaires (cf. Illustration 12) qui présentent des caractéristiques géomorphologiques et des conditions d'alimentation sédimentaire similaires, de manière à affecter sur des tronçons homogènes des vitesses de recul moyennes calculées sur chaque tronçon (cf. Illustration 12).

Illustration 12 : Cellules et sous-cellules sédimentaires du littoral aquitain (à gauche) et représentation schématique et régionale des vitesses de recul du trait de côte entre 1966 et 2009 (à droite) (D'après BRGM, Aubié et al., 2011)

Comme sur la quasi-totalité du littoral aquitain, les transits sédimentaires se font suivant une direction nord-sud dans la sous-cellule de Carcan-Lacanau à laquelle appartient le secteur de Lacanau-Océan. La dynamique sédimentaire de cette sous-cellule est tributaire des sous-cellules situées au nord.

Les installations de bord mer de la station balnéaire Lacanau-Océan commencent à être menacées au milieu des années 70 (Clus-Auby, 2000). Des aménagements successifs vont être mis en place des années 1970 à 1990. Le perré en enrochements et les deux épis mis en place couvrent un linéaire continu de 1,1 km, égal à la totalité du front de mer urbanisé de Lacanau-Océan (cf. Illustration 13). Des reprofilages sont annuellement réalisés en « remontant » le sable de l'estran vers l'arrière des enrochements, aujourd'hui éboulés (illustration Illustration 13) pour stabiliser le trait de côte. La dune bénéficie également d'interventions de conservation (ganivelles, plantations d'oyats et d'agropyron, couverture de branchages).

Illustration 13 : Vue de Lacanau par image satellite GeoEye du 22/08/2009, d'après GoogleEarth (à gauche) ; Epi sud et enrochements (à droite) (photographie, E. Palvadeau, octobre 2010)

Sur le secteur de Lacanau-Océan, on enregistre sur un linéaire de 7 km, répartis de part et d'autre de la station balnéaire, une vitesse de recul du trait de côte moyenne de 0,6 à 0,7 m/an entre 1966 et 2009 (cf. Illustration 14) (Aubié *et al*., 2011). Au nord et au sud de Lacanau-Océan, la dynamique de recul se poursuit.

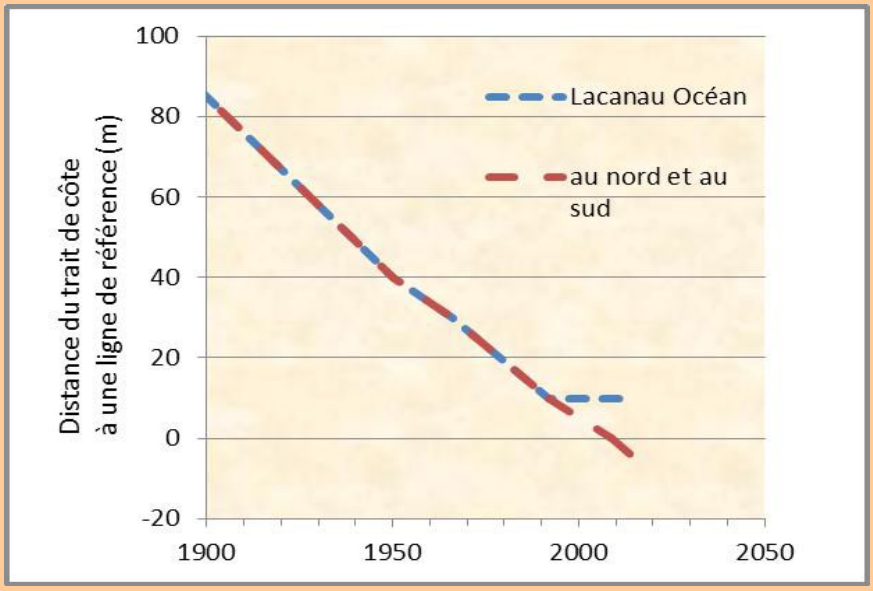


Illustration 14 : Représentation schématique de l'évolution de la position du trait de côte avec ou sans fixation du trait de côte.

Dans ce contexte de trait de côte aménagé, fixé par une barrière d'enrochements et bénéficiant de reprofilages, le suivi de son évolution sur le court terme révèle une vitesse de recul nulle. Néanmoins, au nord et au sud la dynamique naturelle prévaut avec une poursuite du recul du trait de côte (cf. Illustration 14). Ainsi, le front de mer de Lacanau est aujourd'hui « en avancée » vers l'océan par rapport au linéaire côtier adjacent au nord et au sud, l'estran étant pratiquement toujours submergé à marée haute, traduisant ainsi une perte du volume de sable. Aussi, dans le cadre de l'élaboration d'un PPRL, la valeur Tx qui serait retenue pour le zonage de l'aléa recul du trait de côte à échéance 100 ans serait basée sur la vitesse de recul du littoral adjacent.

Encart 8 : Prise en compte de l'impact d'ouvrages dans l'estimation du taux d'évolution du trait de côte : Exemple de la côte orientale de la Corse (BRGM)

L'évolution du littoral sur la côte orientale de la Corse, au nord du port de Taverna, a été fortement perturbée par des aménagements successifs. Le Port de Taverna a en effet été construit en 1972. Une contredigue est construite au nord de celui-ci en 1980. Sur ce secteur du littoral, le transit sédimentaire (composante longitudinale) est orienté vers le nord.

L'évolution du trait de côte a été étudiée sur la période 1948-1996 (Oliveros et Delpont, 1999). En 1977, le trait de côte connaissait un recul sur près de 4 km de rivage entre le port et Moriani-Plage (lieu-dit Padulella) (cf. Illustration 15) de 20 m en moyenne (0,7 m/an sur la période 1948-1977). Localement, le recul a atteint 35 m sur cette période (1,2 m/an). Ramenés à la période sur laquelle l'érosion a pu débuter (hypothèse : effet de la construction des jetées en 1972), les vitesses de reculs sont de 5 m/an en moyenne et 7 m/an au maximum, sur la période 1972-1977. Entre 1977 et 1990, les reculs ont atteint 20 m (1,5 m/an) sur un tronçon au nord du port. En 1996, le recul moyen enregistré depuis 1948 sur près de 4 km est de 39 m (soit 0,8 m/an entre 1948-96 ou 1,6 m/an si on considère un début de l'érosion en 1972). Localement sur les secteurs de Padulella et Vanga di l'Oru (cf. Illustration 15), les reculs atteignent respectivement 70 et 80 m entre 1948 et 1996. Sur la même période, le trait de côte avance fortement au sud du port, par effet de piégeage des sables par la jetée sud.

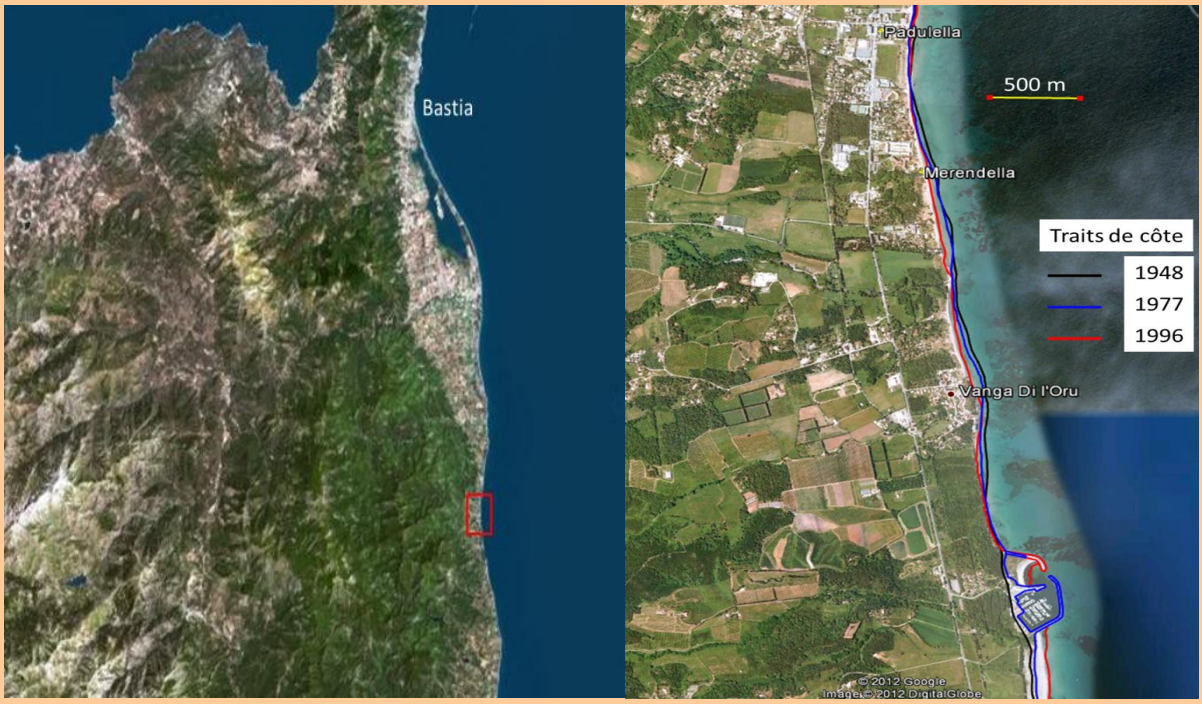


Illustration 15 : Traits de côte en 1948, 1977 et 1996 au nord du Port de Taverna. Fond cartographique Google Earth – Orthophotographie IGN 2007.

Depuis la fin des années 90, le trait de côte présente une stabilité globale sauf sur le secteur Vanga di l'Oru – Padulella dont le trait de côte a reculé de près de 20 m sur la période 1996-2007, avec un taux proche de 1 m/an. Depuis 2003, les suivis réguliers de profils de plage réalisés dans le cadre du ROL (Réseau d'Observations du Littoral de la Corse) permettent d'analyser finement les évolutions du trait de côte. Sur la période 2003-2010, le trait de côte à Merendella est globalement stable avec une évolution de -2 m sur la période (-0,3 m/an), faible au regard des fortes variations annuelles.

Ces exemples d'évolution du trait de côte sur plus de 50 ans illustrent que les vitesses d'évolution doivent être analysées en tenant compte des facteurs qui ont pu conduire à une modification lente ou brutale de la dynamique sédimentaire du fait d'aménagements lourds (jetées, épis…) ou à une modification importante des apports en sédiments (construction de barrages sur un cours d'eau, extraction de sédiments…). Les éventuels changements de tendance observés sur une longue période (inversion, vitesse d'évolution) doivent être recherchés et analysés (avec recherche des causes). Il faut s'assurer que les taux enregistrés dans le passé sont (1) soit toujours valables sur la période récente, (2) soit remis en cause par des phénomènes qui ont conduit à une modification des vitesses d'évolution.

Les taux d'évolution sont connus par intervalles de temps plus ou moins réguliers (dans l'exemple ci-dessus 1948-1977-1996 puis tous les ans à partir de 2003). Dans le secteur de Merendella, ils sont :

1948-1977 : -12m (-0,4 m/an)
1977-1996 : -32m (-1,7 m/an)
1996-2003 : ? (pas de données)
2003-2010 : -2m (-0,3 m/an)

Connaissant la date à partir de laquelle le taux a marqué un changement (1972) en relation avec la construction des ouvrages portuaires, on reconstitue la valeur du recul 1948-1972, en considérant qu'entre 1972 et 1977, le taux de recul est au moins égal à la valeur correspondante à la période qui a suivi (1977-1996), soit -1,7 m/an. Entre 1972 et 1977, le recul est donc estimé à 8,5 m. On reconstitue alors une nouvelle série « période/reculs » :

1948-1972 : -3,5m (-0,15 m/an)
1972-1996 : -40,5m (-1,7 m/an)

Le taux calculé sur la période 2003-2010 (-0,3 m/an) est sans doute encore impacté par les ouvrages portuaires, mais il reste proche du taux calculé sur la période antérieure à la construction (-0,15 m/an).

Dans le cas présent, il conviendrait de combler l'absence de données entre 1996 et 2003 (traits de côte par analyse de photographies aériennes par exemple) de manière à confirmer la diminution du taux d'évolution et de déterminer si le Tx à retenir peut être calculé sur la base des évolutions 1948-1972 et 1996-2010 (calculées sur des périodes au minimum de 10-20 ans).

3 Côtes à falaises

Pour l'analyse de l'évolution des falaises, une analyse des positions successives du trait de côte, comparable à celle menée pour les côtes basses meubles, peut être utilisée. Cependant, des méthodes comparant des surfaces entre deux traits de côte sont souvent plus pertinentes que des méthodes comparant uniquement les positions de traits de côte et/ou de lignes de crête successifs, l'évolution se faisant parfois par effondrements très locaux (cf. Encart 10). Pour chaque secteur de comportement homogène, le taux moyen annuel de recul peut être estimé par :

$$Tx = \frac{S}{C \cdot A}$$

La surface érodée (S) entre les deux traits de côte est rapportée au linéaire de côte du secteur de comportement homogène (C) et divisée par le nombre d'années (A) séparant les deux levés.

Dans les zones de côtes à falaises qui ont été urbanisées, il convient de vérifier l'impact potentiel de l'urbanisation sur l'évolution du trait de côte. Une augmentation du taux moyen annuel de recul peut en effet être observé consécutivement à l'urbanisation de certains secteurs, du fait des modifications du contexte hydrogéologique, avec un "temps de réponse" variable selon les caractéristiques sous-sol et des perturbations du milieu (fuite des réseaux d'eau et d'assainissement, modification des écoulements du sol et du sous-sol).

Les ouvrages de protection en pied de falaises peuvent limiter dans une certaine mesure le recul du trait de côte. Cependant, étant donné les origines le plus souvent à la fois maritime et continentale du recul, l'impact de tels ouvrages ne doit pas être pris en compte.

2.2.2.b - Détermination du recul maximal ponctuel lié à un événement majeur Lmax

1 Généralités

Une analyse correcte ne peut se restreindre à une analyse des évolutions sur le long terme ; les variations saisonnières ainsi que les évolutions ponctuelles doivent être estimées. Même sur des secteurs sans tendance érosive, les impacts d'événements de tempête, bien que compensés naturellement à long terme dans certains systèmes, peuvent ne pas être négligeables.

La zone susceptible d'être érodée lors d'un événement ponctuel majeur peut être supérieure à la zone érodable à échéance 100 ans. C'est le cas en particulier d'une côte basse dont la tendance d'évolution à long terme est stable (Tx = 0). Cela ne signifie cependant pas que la position du trait de côte est fixe. Elle peut varier au sein de « l'espace de liberté du littoral ». Cela peut être le cas également pour les côtes à falaises, où le recul moyen de la position du trait de côte sur 100 ans peut être inférieur à un recul ponctuel, en particulier si les événements sont de grande ampleur et rares ou si la période d'observation pour la détermination du Tx n'est pas représentative du cycle d'évolution (cf. Encart 10).

Illustration 16 : Recul exceptionnel lors de la tempête du 30 mars 2008 à Blainville sur Mer (50) – Photos a, b et c respectivement prises à 8h42, 9h30 et 9h36 (Photos : DDTM 50)

2 Côtes basses meubles

Pour les côtes basses meubles, le recul du trait de côte lié à un événement tempétueux majeur Lmax peut être déterminé par une analyse des reculs ponctuels passés lorsque des données historiques sont disponibles et/ou par la mise en œuvre d'un modèle numérique permettant d'estimer le recul lié à une tempête spécifique (cf. Encarts 12). Pour les plages, l'évolution du trait de côte (avancée ou recul) résulte du remaniement continu des sédiments. Lors d'une tempête, l'action de la mer est portée sur le haut de la plage, la dune ou le cordon dunaire. Cela se traduit par un recul du pied de dune et une redistribution des sédiments sur le profil (cf. Illustration 17). Le recul Lmax concerne cette variation morphologique du haut de plage, zone non attaquée par la mer auparavant. L'estimation de Lmax s'appuie donc sur les indicateurs associés au haut de plage (pied de dune…).

L'analyse menée ici peut également être exploitée dans le cadre de l'analyse de l'aléa submersion marine afin de définir les hypothèses de défaillances des cordons naturels.

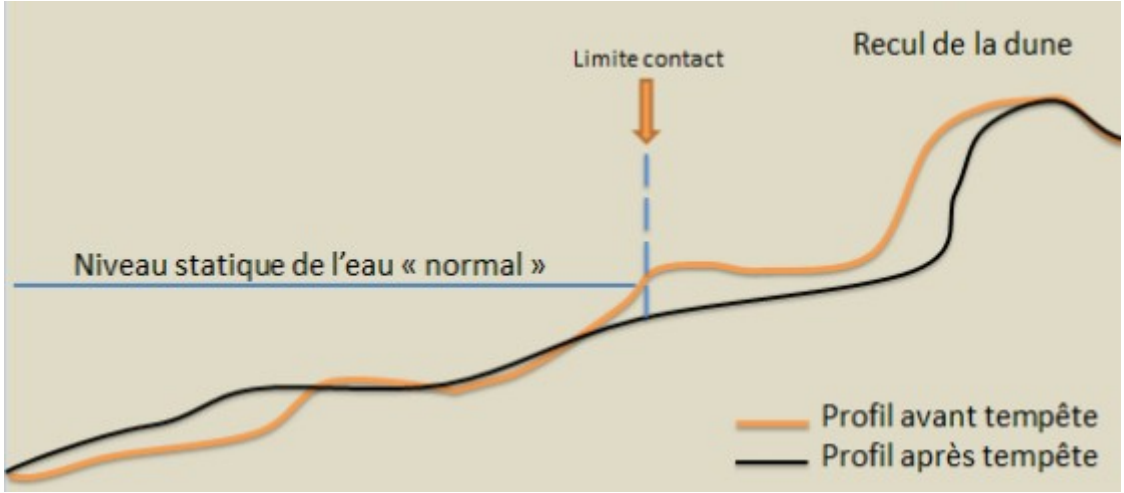


Illustration 17 : Recul de dune lors d'une tempête (Source : BRGM)

Encart 9 : Bilan des méthodes d'estimation de l'impact d'un événement en termes de recul ponctuel du trait de côte (BRGM)

Pour les côtes basses sableuses, des événements tempétueux extrêmes peuvent provoquer une érosion considérable de la dune littorale et un recul important du trait de côte. Ce recul maximal (Lmax) doit être pris en compte dans la méthode d'estimation de l'aléa recul du trait de côte. Plusieurs méthodes sont possibles pour évaluer ce recul maximal. Le rapport BRGM/RP-63157 (Desmazes et al., 2014) fourni des éléments de contexte, des illustrations et des détails méthodologiques complémentaires à cet encart.

1. Observation du recul dunaire lié aux tempêtes

L'observation du recul des dunes après une tempête est fondamentale pour mieux connaître la dynamique érosive des zones à enjeux. Les bases de données topographiques et les mesures réalisées avant et après des tempêtes majeures sont des éléments de connaissances primordiaux. Les informations historiques et tous les types d'observations disponibles (photographie, description…) sont également à prendre en considération pour renseigner l'impact réel des tempêtes sur les zones basses sableuses et dunaires. Ces approches nécessitent au minimum la connaissance d'un profil topographique perpendiculaire et représentatif de l'environnement étudié (plage, dune et arrière-dune). Ainsi, sur la côte atlantique, les observations réalisées après la tempête Xynthia ont permis d'estimer des reculs moyens de l'ordre de 10 m (Illustration 18), pouvant atteindre ponctuellement 30 m (Garcin et al., 2011). Lorsque les mesures et les observations de terrain n'existent pas ou sont trop lacunaires pour être interprétables, d'autres méthodes d'estimation peuvent être mise en œuvre. Toutefois ces approches nécessitent au minimum la connaissance d'un profil topographique perpendiculaire et représentatif de l'environnement étudié (plage, dune et arrière-dune).

Illustration 18 : Recul exceptionnel de la dune suite à la tempête Xynthia - mars 2010 – La Tranche sur Mer, Vendée (Photo : BRGM)

2. Formules empiriques d'estimation du recul dunaire

Les principales méthodes qui permettent d'estimer les évolutions morphologiques des dunes lors d'événements extrêmes sont basées sur des formules empiriques décrivant le profil perpendiculaire de la plage après la tempête. Ces formules se basent sur l'hypothèse que les plages adoptent un profil en équilibre avec les conditions environnementales rencontrées (Bruun, 1954, Vellinga, 1986, Dean, 1991).

a) Méthode FEMA

Aux Etats-Unis, la FEMA, Federal Emergency Management Agency, propose d'utiliser une règle simple, dérivée de la formule de profil d'équilibre proposée par Vellinga (1986) et applicable sur les côtes de l'Atlantique et du Golfe du Mexique. Cette règle établit un volume de dune érodée en fonction de la période de retour (« T » en années) associée au niveau d'eau extrême. Pour un profil perpendiculaire au trait de côte, la dune est érodée d'une aire « A » (en m²) selon la formule suivante : $A = 8 \times T0.4$
Pour un niveau d'eau centennal statique, l'érosion correspond à 540 pieds carrés (540 SF) et donne son nom à la règle (FEMA, 1995). Cette règle des 540 SF est basée sur l'analyse de nombreuses séries d'observations « reculs de dune / tempête ». Elle n'est pas utilisable sur les plages/dunes à granulométrie mixte (sables/galets) ou très grossière (graviers/galets).
Le stock sédimentaire de la dune est obtenu en calculant la surface comprise entre la ligne « niveau d'eau centennal statique » et la verticale au point culminant (Illustration 19). Si cette surface est supérieure à 50 m² (ou 540 pieds carrés), la dune est censée résister à la tempête.

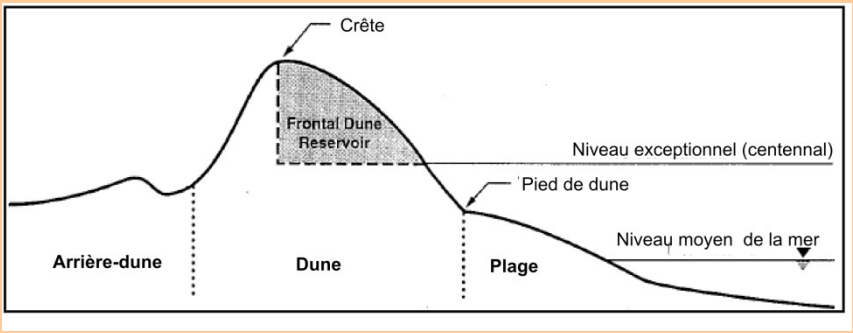


Illustration 19 : Représentation du calcul du volume du stock maximum mobilisable par un événement caractérisé par un niveau d'eau centennal, valeur limite avant disparition de la dune (Source : FEMA, 1995)

Cette règle est également utile pour obtenir une valeur du recul maximal pour un événement caractérisé par un niveau d'eau centennal, qui retire un volume égal à 50 m². Lmax est alors obtenu, pour un profil donné de dune, de telle sorte que la surface mobilisable (zone grisée sur l'illustration 19) soit égale à 50 m². Compte tenu de l'empirisme de cette règle, il est nécessaire de s'assurer de la cohérence du résultat obtenu avec des observations disponibles de reculs dans la région étudiée (suivi de profils de plage/dune pré- et post-tempêtes).

b) Méthode DUROS

Aux Pays-Bas, la méthode DUROS (DUne éROSion) est mise en œuvre pour estimer la résistance des dunes à l'érosion lors des tempêtes. Depuis 1986 (Vellinga, 1986), cette méthode est régulièrement améliorée en utilisant notamment les résultats de modèles réduits physiques et de canaux à houle. Le profil de plage post-tempête reproduit par la méthode se décompose en trois parties (Illustration 20):
1) Pour la face dunaire, la pente est linéaire, telle que y = x
2) Pour la plage après le pied de dune, le profil d'équilibre de forme parabolique est défini tel que y=f(x). Ce profil s'étend jusqu'au point (x_{max}, y_{max})
3) Au large du point (x_{max}, y_{max}), la pente est fixe et linéaire, telle que y = x/ 12,5

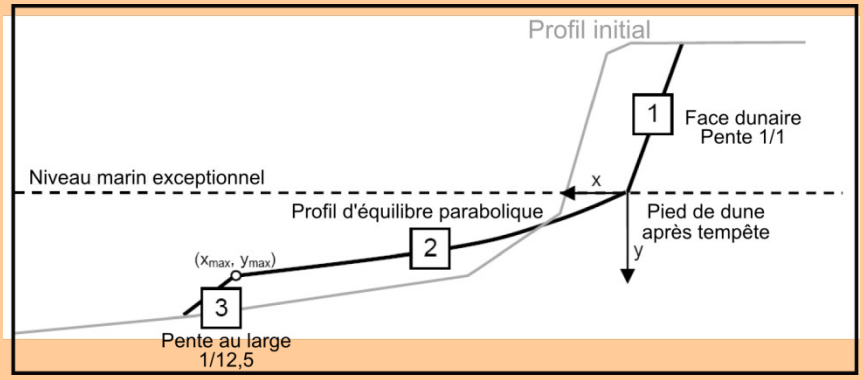


Illustration 20 : Les trois éléments constituant le profil de plage après tempête pour la méthode DUROS (d'après van Gent et al., 2008).

Les coordonnées (x_{max} , y_{max}) sont définies telles que :

$$x_{max} = 250\left(\frac{H_{0s}}{7.6}\right)^{1.28}\left(\frac{0.0268}{w_s}\right)^{0.56}$$

et

$$y_{max} = \left(0.4717\left(250\left(\frac{12}{T_p}\right)^{0.45} + 18\right)^{0.5} - 2.0\right)\left(\frac{H_{0s}}{7.6}\right)$$

H_{0s} (m) correspond à la hauteur significative des vagues au large, T_p (sec) est la période pic de vagues au large, w_s (m/s) est la vitesse de chute des sédiments.
La formule Duros+ (van Gent *et al.*, 2008) exprime la fonction parabolique y=f(x) de la plage :

$$\left(\frac{7.6}{H_{0s}}\right) y = 0.4714\left(\left(\frac{7.6}{H_{0s}}\right)^{1.28}\left(\frac{12}{T_p}\right)^{0.45}\left(\frac{w_s}{0.0268}\right)^{0.56} x + 18\right)^{0.5} - 2$$

La détermination du recul dunaire nécessite ensuite de comparer le profil initial avec le profil estimé par la méthode DUROS. Cette méthode est spécifiquement adaptée aux profils de plages néerlandaises subissant les tempêtes de la mer du Nord, mais elle peut être testée sur les environnements métropolitains similaires constitués de dunes relativement hautes, d'un trait de côte rectiligne et dont le transport sédimentaire est essentiellement perpendiculaire à la côte.

c) Méthode de Kriebel et Dean (1993)

La méthode mise au point par Kriebel et Dean (1993) permet de prendre en considération plusieurs types de plages. Comme DUROS, elle est également liée à l'utilisation de formules qui représentent le profil d'équilibre de la plage après une tempête. La valeur « R∞» du recul est déterminée par une formule qui dépend du profil initial de la plage et qui considère que l'évolution au cours de la tempête est complète. 4 formules sont proposées en fonction du profil initial théorique (Illustration 21).

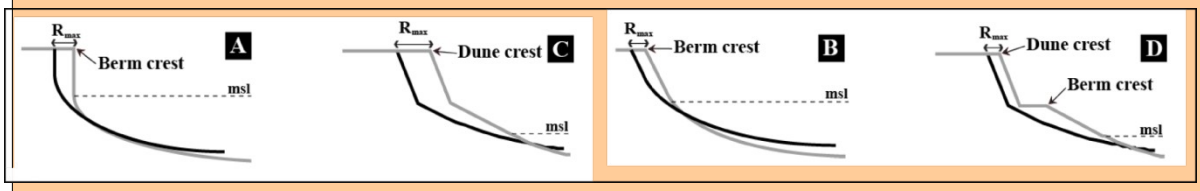


Illustration 21 : Les quatre profils de plage initiaux pris en compte par la méthode de Kriebel et Dean (1993)

Le profil A présente un haut de plage vertical jusqu'au niveau de la berme (barre sableuse submersible de haut de plage), la valeur « R∞» est définie telle que :

$$R_\infty = \frac{S\, x_b}{B + h_b - \frac{S}{2}}$$

Le profil B présente un haut de plage en pente linéaire jusqu'à la berme, « R∞» est tel que :

$$R_\infty = \frac{S\left(x_b - \frac{h_b}{m}\right)}{B + h_b - \frac{S}{2}}$$

Le profil C présente un haut de plage en pente linéaire et une dune, « R∞» est tel que :

$$R_\infty = \frac{S\left(x_b - \frac{h_b}{m}\right)}{B + D + h_b - \frac{S}{2}}$$

Le profil D est caractérisé par une berme en haut de plage et une dune, « R∞» est tel que :

$$R_\infty = \frac{S\left(x_b - \frac{h_b}{m}\right)}{B + D + h_b - \frac{S}{2}} - \frac{W\left(B + h_b - \frac{S}{2}\right)}{B + D + h_b - \frac{S}{2}}$$

Avec x_b (m), correspondant à la largeur de la zone de déferlement ; h_b, la profondeur de déferlement les vagues ; m, la pente de la face maritime de la dune ; S (m), la surcote ; B (m) la hauteur de berme et D(m), la hauteur de la dune.
La seconde particularité de la méthode de Kriebel et Dean (1993) est de considérer que l'évolution du profil de plage durant la tempête nécessite au préalable un temps de réponse aux forçages. La durée de la tempête et le temps de réponse de la plage sont donc des éléments déterminants pour estimer la quantité d'érosion du haut de plage et le recul dunaire. Les hypothèses et les éléments utiles pour estimer le temps de latence du profil de plage ne sont pas détaillés dans cet encart synthétique, mais ils peuvent être étudiés dans la publication de Kriebel et Dean (1993), récemment repris par Almeida et al., 2011 dans le cadre du projet Européen Micore (https://www.micore.eu/).

Les méthodes empiriques basées sur la notion de profil d'équilibre doivent être employées avec précaution pour estimer le recul dunaire, car les incertitudes sont importantes et très dépendantes de la configuration des plages. De plus, ces formules empiriques ne tiennent pas compte de manière exhaustive de l'ensemble des phénomènes hydrodynamiques impliqués dans l'érosion de la plage durant les tempêtes.

Les modèles numériques d'estimation du recul dunaire sont des outils qui permettent la prise en compte de ces processus complexes agissant dans la zone littorale. Ainsi, le modèle SBeach (Larson et Kraus, 1989) estime l'extension de la zone du jet de rive et le transport des sédiments pour déterminer l'évolution du profil de plage et de la dune lors d'une tempête. Des améliorations ont été apportées récemment afin de reproduire les effets des overwash sur le profil de plage (Donelly et al., 2006). Cet outil est couramment employé en ingénierie côtière, mais l'interprétation des résultats reste tributaire de bonnes données de contrôle (événements passés observés, suivis pré et post-tempête).
On peut aussi citer le développement récent du modèle Xbeach (Roelvink, 2009) qui vise à reproduire les composantes parallèles et perpendiculaires à la côte des phénomènes hydro-sédimentaires lors des tempêtes. Ce

type de modèle se situe au niveau de l'état de l'art en recherche, il est toujours en phase de développement. Sur des zones à enjeux, où la dynamique des dunes est sensible et complexe, ce type d'approche numérique peut permettre d'améliorer et de compléter les résultats des méthodes empiriques d'estimation du recul dunaire lors d'évènements exceptionnels. Mais il demeure que les résultats obtenus doivent toujours être confrontés aux observations, et, dès lors que l'on se place sous des conditions extrêmes (niveau marin extrême, violentes vagues…), ils doivent être discutés avec soin.

Dans le cas d'une côte basse meuble protégée par un ouvrage longitudinal s'étant substitué à la morphologie pré-existante, la défaillance probable de l'ouvrage doit dans tous les cas être envisagée cette défaillance pouvant intervenir du fait de la dégradation ou de l'occurrence d'un événement supérieur à l'événement de dimensionnement de l'ouvrage.
Le recul ponctuel du trait de côte lors d'un événement tempétueux et en cas de défaillance de l'ouvrage doit être estimé et intégré à l'aléa de référence. S'il n'est pas possible d'estimer ce recul ponctuel, un recul forfaitaire est appliqué. Celui-ci est de 20 m à partir de la partie supérieure de l'ouvrage de haut de plage.

3 Côtes à falaises

Pour les côtes à falaises, la valeur de recul maximal est caractéristique de la géologie (lithologie, stratigraphie, structure, fracturations…) et des interactions avec l'eau présente ou circulant dans le massif et la mer en pied de falaise. Le recul de type effondrement/éboulement ou glissement peut être déterminé à partir de l'analyse des reculs historiques, des caractéristiques géologiques des falaises ou d'études géotechniques (cf. encart 10).

Encart 10 : L'analyse de l'évolution du trait de côte sur une côte à falaises : les falaises de craie de Mers-les-Bains/Le Tréport (CETE Nord-Picardie)

Le littoral de Mers-les-Bains et Le Tréport est en majeure partie constitué de falaises subverticales pouvant atteindre jusqu'à 100 m de hauteur (cf. Illustration 31). Elles sont les témoins de l'érosion des grands plateaux crayeux du nord du Bassin de Paris. Elles encadrent la basse vallée de la Bresle et s'étendent sur un linéaire d'environ 5 km.

Illustration 22 : Vue sur les falaises du Tréport et de Mers-les-Bains (Source : CETE NP)

Analyse du fonctionnement des falaises
Ces falaises datent du Turonien et du Coniacien (Crétacé Supérieur) et sont constituées d'une craie blanche relativement tendre, contenant parfois des lits indurés de silex noirs conférant une certaine rigidité à la forma-

tion géologique. Elles sont prolongées sur environ 300 m par un platier rocheux où la présence de galets et de sables est relativement rare. Un certain nombre de discontinuités sont visibles sur le platier (inspection sur site, photographies aériennes) et sur les falaises (inspection sur site).

L'étude des événements historiques a montré que deux types de mouvements de terrain étaient généralement observés sur ces falaises : des éboulements et chutes de blocs et des écroulements. L'instabilité de ces falaises provient essentiellement de la fracturation et du vieillissement du massif crayeux mais aussi de l'action de la houle et des vagues en pied de falaise qui effectue un travail de sape (cf. Illustration 33). Dans chaque cas, les facteurs d'érosion météoriques (pluie, gel) sont souvent des facteurs déclenchant des mouvements de terrain.

Illustration 23 : Détail du pied de falaise du Tréport attaqué par la mer à chaque marée (Source : CETE NP)

De part la configuration des lieux (orientation de la côte, fracturation du massif, etc.), le secteur de Mers-les-Bains, au nord de la vallée de la Bresle est dissocié du secteur du Tréport, situé au sud. Ce découpage permet de différencier les caractéristiques des événements et la dynamique de l'érosion sur chaque secteur, avec notamment le recul instantané consécutif à un événement ponctuel (Lmax) et le taux moyen annuel du recul du trait de côte (Tx).

Détermination de Lmax

Le recul instantané suite à un événement ponctuel (Lmax) dépend directement du fonctionnement et de la configuration des falaises. Pour cela, une bibliographie, les visites de terrain et l'analyse des événements historiques ont permis d'estimer ce recul instantané sur chaque secteur préalablement définis.

Côté Mers-les-Bains, l'analyse de la bibliographie et des photographies et les visites de terrain ont montré que les événements sont plus fréquents mais de tailles moins importantes qu'au Tréport. Cela semble être corroboré par le très peu d'information disponible dans la presse, la taille des événements ne suscitant que peu d'intérêt. Ceci s'explique par le fait que d'une part, la côte est globalement orientée selon un angle proche de celui

d'une des familles de discontinuités observées. D'autre part, la densité de la fracturation des falaises induit le découpage des pans de falaises en petites unités qui ont tendance à s'ébouler régulièrement.

Côté Le Tréport, la bibliographie fait en revanche état d'un événement ayant fait reculer la falaise de 20 m à Mesnil-Val sur la commune de Criel-sur-Mer, voisine du Tréport (Dewez & Rohmer, 2011). De plus, la fracturation est moins dense qu'à Mers mais deux directions sont bien marquées et individualisent des blocs sous forme de dièdres bien délimités (cf. Illustration 34). Les événements historiques sont généralement des événements de grande ampleur. Sur les photos aériennes, les traces d'éboulis en pied de falaises sont moins nombreuses qu'à Mers-les-Bains, faisant état d'une fréquence moindre.

Illustration 24: Découpage du trait de côte selon les principales orientations des discontinuités observées sur site (Source : Ortholittorale 2000).

Lmax correspond au recul instantané suite à l'événement le plus important connu (bibliographie, historique). Cependant, du fait de la difficulté de retrouver ces informations lors des recherches historiques, il est nécessaire de prendre en considération la configuration des falaises et le contexte dans lequel elles se trouvent. Par exemple, les événements historiques sur le secteur de Mers-les-Bains ne semblent pas représentatifs de ce qui pourrait arriver. Dans ce cas-là, l'expert est indispensable pour évaluer un possible retrait instantané de la côte à partir du contexte et de la configuration des lieux.

Évaluation du taux moyen annuel de recul du trait de côte (Tx)

Un grand nombre de méthodes existe pour déterminer le taux de recul moyen d'une falaise, faisant intervenir de multiples données (mesures directes de topographie, mesures de points d'appui sur des documents cartographiques, photogrammétrie, etc.). Les méthodes appliquées dépendent essentiellement des données disponibles sur le secteur d'étude.

Pour le secteur de Mers-les-Bains/Le Tréport, étaient disponibles :
- les photographies aériennes orthorectifiées par l'IGN (missions de 1947, 1952, 1977),

- l'ortholittorale de 2000,
- le Modèle Numérique de Terrain (MNT) issu d'un relevé au LIDAR de 2011.

Les missions aériennes et le MNT ont fait l'objet d'un levé du haut de la falaise sous SIG. Le haut de falaise est en effet l'indicateur du trait de côte le plus approprié, les parois des falaises étant quasiment verticales. La précision de chacun de ces levés dépend de l'échelle du document, de la qualité des photographies et de l'opérateur qui les réalise.

Deux méthodes d'analyse diachronique complémentaires ont été utilisées pour évaluer le taux moyen annuel de recul du trait de côte (Tx) :
- une méthode « traditionnelle » : bilan surfacique entre deux levés de trait de côte,
- une méthode statistique utilisant une régression linéaire avec l'outil MobiTC.

La première méthode, dite « traditionnelle » est une méthode simple, économique et qui nécessite peu de données. Dans la pratique, l'application de la méthode nécessite le découpage de la côte en intervalles réguliers sur chaque tronçon de côte au comportement homogène (cf. Illustration 35). Pour chaque intervalle, le taux moyen de recul est estimé :

$$Tx = \frac{S}{C \,.\, A}$$

La surface érodée (S) entre les deux traits de côte est rapportée au linéaire de côte de l'intervalle (C) et divisée par le nombre d'années (A) séparant les deux levés.

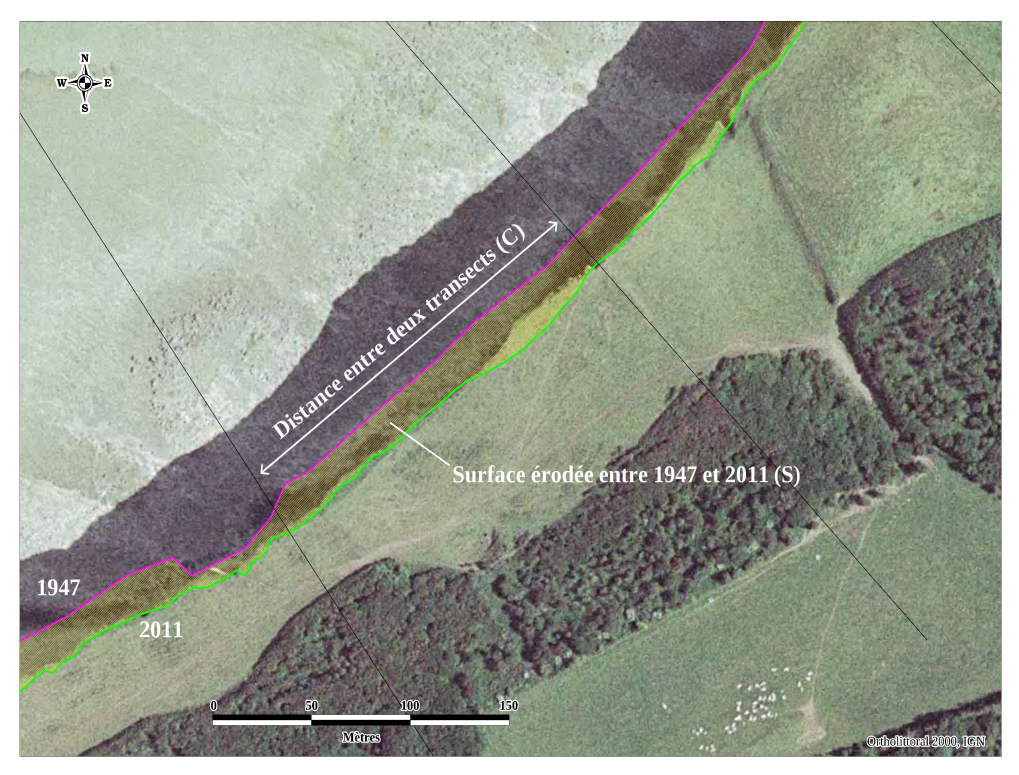


Illustration 25 : Exemple de découpage de la côte et bilan surfacique du recul entre 1947 et 2011 (Source : Ortholittorale 2000 et CETE Nord-Picardie)

Cette méthode présente l'avantage de donner une estimation du taux de recul moyen des falaises en prenant en compte l'ensemble du linéaire. Elle n'intégrera toutefois pas les éventuelles variations temporelles (accélération et ralentissement notamment).

La deuxième méthode, exploitant l'outil MobiTC, est une méthode plus complète qui permet d'estimer le recul du trait de côte selon des transects perpendiculaires à la côte, séparés par un pas de distance donné. Pour chaque transect, les différentes positions du trait de côte sont mesurées par rapport à une ligne de référence et reportées en fonction du temps. Les distances mesurées serviront alors à calculer une droite de régression linéaire ; la pente de cette droite correspondant au taux de recul (Tx). La précision de Tx dépendra fortement du nombre de traits de côte disponibles.

L'avantage d'une telle méthode est la prise en compte de l'ensemble des traits de côte disponibles. Néanmoins, cette méthode de détermination de Tx peut s'avérer rapidement biaisée si le recul de la falaise est très lent et que des événements de grande ampleur ont eu lieu dans la période d'observation.

En effet, comme il a été observé au Tréport, les positions des différents traits de côte sur les 64 ans d'observation sont très proches et seuls quelques événements de grande ampleur ont eu lieu. L'outil MobiTC a donc estimé des taux de recul très faibles sur la majorité du linéaire de côte, côté Tréport, et lorsqu'un événement avait eu lieu, le taux de recul estimé était bien trop important par rapport au reste du linéaire.

Du côté de Mers-les-Bains, les estimations du taux de recul moyen du trait de côte étaient plus modérées. Ceci s'explique en grande partie par le fonctionnement des falaises qui est légèrement différent entre les deux sites (Mers-les-Bains et Le Tréport). En effet, d'après les observations, les falaises du Tréport semblent être affectées par des événements rares mais de grande ampleur. En revanche, les falaises des Mers-les-Bains subissent plutôt des éboulements de plus petites tailles mais plus fréquents.

2.2.3 - Caractérisation de l'aléa de référence

L'aléa de référence recul du trait de côte est défini à partir du recul estimé à horizon 100 ans, issu de la projection des tendances passées, éventuellement modulée si ces tendances ne sont plus représentatives des tendances à venir, **auquel est ajouté le recul susceptible d'intervenir lors d'un événement ponctuel majeur** :

Lr = 100 Tx + Lmax

Avec Lr la largeur de la zone d'aléa (en m)

Tx le taux de recul annuel (en m/an)

Lmax la valeur du recul du trait de côte consécutif à un événement tempétueux majeur pour les côtes basses meubles ou dû à un événement brutal majeur (en m).

La zone soumise à aléa n'est donc pas définie uniquement par une projection des tendances passées.

Pour chaque secteur de comportement homogène, les enveloppes suivantes seront définies :

- la zone **100Tx** déterminée par projection sur 100 ans du taux de recul du trait de côte annuel issu des tendances passées observées sans prise en compte des effets du changement climatique autres que ceux qui sont implicitement intégrés dans le taux observé sur la période passée. La zone soumise à la mobilité du trait de côte sous l'effet de l'érosion sur les 100 prochaines années est délimitée par le trait de côte actuel et par celui à échéance 100 ans, se basant sur le taux annuel de recul (Tx).
- le recul **Lmax** lié à un événement tempétueux majeur. L'analyse des reculs ponctuels du trait de côte doit veiller à la comparaison d'indicateurs de position du trait de côte comparables entre eux. Lmax est le recul ponctuel maximal qui peut être observé sur une période aussi longue que possible ou défini à dire d'expert.

2.2.4 - Qualification de l'aléa

Il existe un seul niveau d'aléa, l'aléa fort. En effet, la nature de l'aléa implique une disparition du terrain concerné qui ne pourrait se voir appliquer des prescriptions réglementaires.

Le recul des côtes à falaises peut quelquefois générer des dangers pour les personnes (chutes de blocs, coulées boueuses) en pied de falaise. Cet autre aléa, qui sera qualifié de fort, peut être mentionné si nécessaire.

2.2.5 - Estimation d'un aléa recul du trait de côte intégrant l'impact du changement climatique

La question de la vulnérabilité des territoires et de son évolution dans le temps revêt un caractère crucial dans la gestion des zones littorales au regard de l'accroissement démographique attendu et de l'impact prévisible fort du changement climatique sur la configuration des côtes basses. Par conséquent, il convient, dès lors que cela est possible, de prendre dès maintenant les mesures nécessaires pour limiter la vulnérabilité future des territoires aux aléas côtiers face à l'augmentation prévisible du niveau marin sur le littoral français.

Ainsi, l'aléa de référence intègre l'impact du changement climatique dès lors que cet impact peut être quantifié. Il n'existe cependant pas à ce jour de méthode unique adaptée pour déterminer la zone qui pourrait être érodée du fait du changement climatique (cf. Encart 11). **La détermination de l'impact du changement climatique sur le recul du trait de côte n'a donc pas un caractère obligatoire**.

Toutefois, dès lors qu'il est identifié que les évolutions prévisibles d'une ou plusieurs composantes de l'aléa de référence (par exemple modification de la direction des houles entraînant un réalignement du trait de côte, modifications des trajectoires de tempêtes, ...) peuvent avoir un impact non négligeable en termes de recul du trait de côte du fait du changement climatique, il convient d'en tenir compte lors de la cartographie de l'aléa, s'il est possible d'en quantifier les effets.

Encart 11 : Analyse de l'impact de l'élévation du niveau moyen de la mer sur le recul du trait de côte

L'impact de l'élévation du niveau de la mer sur l'érosion et le recul du trait de côte est très difficile à estimer.

Pendant les 50 dernières années, la loi de Bruun (1962) a constitué la principale méthode d'analyse. Aujourd'hui cependant, l'ensemble de la communauté scientifique s'accorde à dire qu'elle ne peut être utilisée que pour l'obtention d'un premier ordre de grandeur, lorsque les évolutions des stocks sédimentaires et les vitesses de recul ne sont pas trop fortes. En effet, ne prenant en compte que les mouvements de sédiments dans le profil et n'étant applicable que sur des plages en équilibre sédimentaire, il ne reste que peu de secteurs où l'impact de la dérive littorale ou d'aménagements peuvent être ignorés (Rollason, 2010).

Cette loi part du principe que l'élévation du niveau de la mer entraîne nécessairement de l'érosion. Or les écosystèmes côtiers ont un certain niveau de résilience, lié aux interactions entre les processus hydrosédimentaires et biologiques, qui peut limiter voire contrer cet effet (Kirwan *et al.*, 2010). La réponse de l'écosystème diffère cependant selon un certain nombre de paramètres : une couverture végétale, des vitesses d'élévation du niveau moyen de la mer modérée, un marnage important et une forte concentration de sédiments en suspension favorisant la résilience du système. Sur des sites en accrétion où la disponibilité en sédiments est toujours avérée, des tendances à l'accrétion peuvent ainsi se confirmer, en particulier dans certains estuaires. Ainsi, l'ensemble des processus relatifs à la disponibilité des sédiments n'est pas pris en compte dans la loi de

Bruun. Plusieurs méthodes ont été développées à partir de cette loi pour prendre en compte certains transferts sédimentaires (Stive *et al.*, 2009).

Les méthodes permettant d'estimer les évolutions du trait de côte sous l'effet de l'impact du changement climatique ont fortement évolué récemment. Elles se basent sur une plus ample prise en compte des phénomènes impactant l'évolution du trait de côte, l'impact des vagues notamment. Plusieurs types de modèles existent (Ranasinghe, 2011 ; Patterson, 2009 ; Huxley, 2010). Ils peuvent s'appliquer à des linéaires allant d'un profil de plage à un linéaire régional, à des échelles de temps allant de l'heure à une centaine d'années, et permettent de prendre en compte les évolutions liées à l'évolution du niveau moyen de la mer ou des conditions hydrodynamiques. Ces méthodes, plus proches des principaux phénomènes naturels en jeu que la loi de Bruun, encore peu utilisées de manière opérationnelle mais rendues possibles grâce à une disponibilité des données de plus en plus grande, vont être amenées à fortement se développer. Elles permettent d'estimer des tendances d'évolution futures, sur les dizaines d'années à venir, mais sont à prendre avec un recul important du fait des fortes incertitudes.

La méthode de Bruun en premier ordre de grandeur, l'utilisation de modèles, couplés à une analyse géomorphologique et confrontés aux données de terrain (levés d'indicateur de trait de côte et de mouvements sédimentaires), font aujourd'hui partie des outils d'aide à la décision concernant les impacts du changement climatique.

2.2.6 - Résultats attendus

Les résultats obtenus par les différentes investigations réalisées sont consignés dans un rapport d'étude récapitulant :

- la liste des données et informations mobilisées,
- les méthodologies employées et la justification des hypothèses,
- les analyses menées,
- les résultats.

Un cahier des cartes de synthèse (du 1/5 000 au 1/10 000) est produit. Il comprend :

- une carte reprenant les différentes positions du trait de côte historiques disponibles, la délimitation des cellules hydro-sédimentaires, les ouvrages de protection, les secteurs de comportement homogène, le sens des transits, les vitesses d'évolution du trait de côte,
- une carte de l''aléa recul du trait de côte de référence, précisant si possible les incertitudes et intervalles de confiance associés,
- si possible, une carte de la position du trait de côte estimée à échéance 100 ans avec prise en compte du changement climatique. Les positions estimées du trait de côte à échéance 20 et 50 ans peuvent également être précisées.

2.3 - Aléa migration dunaire

La démarche de détermination de la zone soumise à l'aléa est composée de deux phases, une estimation qualitative et quantitative de l'évolution passée du front dunaire (dans le cadre de l'analyse du fonctionnement du littoral) puis la détermination de la zone soumise à aléa migration dunaire. La caractérisation de l'aléa migration dunaire repose sur la synthèse de l'évolution des côtes issue de l'analyse du fonctionnement du littoral (cf. le cahier technique sur l'analyse du fonctionnement du littoral). L'analyse qualitative de l'évolution du littoral préalablement réalisée et les positions du front dunaire identifiées sont exploitées lors de cette phase pour déterminer par secteur de comportement homogène le taux moyen annuel de migration.

2.3.1 - Définition de la migration dunaire

La migration dunaire est le mouvement, vers l'intérieur des terres, de dunes mobiles non stabilisées par la végétation. Ces mouvements sont souvent associés à des dunes libres, dites transgressives, qui reculent vers l'intérieur des terres par progression de leur versant interne, appelé versant d'ensevelissement. Les grandes phases d'avancées dunaires caractérisant entre autre la côte d'Aquitaine ou la côte d'Opale ont été, dès la fin du 19ème siècle, maîtrisées par une politique active de plantation. Actuellement, bien que peu fréquents le long du littoral français, ces phénomènes peuvent menacer des habitations, des voies de communication ou des cultures, comme c'est le cas actuellement sur la rive nord de l'estuaire de l'Authie dans le Pas-de-Calais (cf. Illustration 26).

Illustration 26 : Versant d'ensevelissement, rive nord de la baie d'Authie (80) (Photo : M-H Ruz)

Ces phénomènes se rencontrent habituellement le long de côtes exposées à de forts vents de mer et où le volume de sable disponible est important. Ils peuvent être initiés par l'érosion marine d'un versant dunaire en falaise sableuse, à partir de laquelle, sous l'effet de la déflation éolienne (érosion par le vent), se mettent en place des dunes de sommet de falaise (dunes perchées) qui progressivement migrent vers l'intérieur des terres. La déstabilisation du couvert végétal, qu'elle soit d'origine naturelle (sécheresse, feux, animaux rongeurs…) ou anthropique (piétinement, véhicules…) peut également entraîner la formation de couloirs de déflation (siffle-vent) ou de cuvettes de déflation (caoudeyres) qui, en cas de dynamique éolienne active peuvent aboutir à la formation d'une dune parabolique dont la progression vers l'intérieur des terres entraîne l'ensevelissement progressif des terrains adjacents.

Les migrations dunaires se caractérisent, en règle générale, par des évolutions morphologiques et des processus plus lents que pour les autres aléas littoraux, et par leurs effets spatiaux plus circonscrits. Cependant, les

volumes de sable remaniés sont parfois considérables et peuvent menacer les biens (ensablement de construction), voire la sécurité des personnes lorsque la progression des dunes s'accompagne « d'avalanches dunaires ».

2.3.2 - Choix des valeurs de référence

La délimitation de l'aléa de référence s'appuie d'une part sur la connaissance du taux moyen annuel de migration Tx, déterminé à partir de l'analyse des positions successives du front de dune côté terre. La détermination d'un taux moyen annuel de recul repose sur l'hypothèse que le recul du trait de côte est linéaire dans le temps. Une attention particulière doit être apportée aux incertitudes associées à la détermination de la position du front dunaire, qui sont à prendre en compte si nécessaire sous la forme d'une migration supplémentaire définie par l'incertitude liée à la donnée de base et/ou la borne supérieure de l'intervalle de confiance de la projection, si l'analyse des données de base le juge nécessaire. Le taux d'évolution du front dunaire annuel est extrapolé à échéance 100 ans, sur la base de conditions considérées comme invariantes dans le temps. L'ensemble des facteurs influençant l'évolution du front dunaire doivent être pris en compte. En particulier, si les tendances passées ne sont pas représentatives des tendances à venir et si une avancée plus importante peut être attendue, une pondération des taux d'évolution passée peut être proposée.

La détermination de l'aléa de référence s'appuie d'autre part sur une avancée dunaire consécutive à un événement tempétueux majeur, appelée Lmax. La valeur de Lmax est déterminée à partir de l'analyse des évolutions historiques du front dunaire.

Dans le contexte du changement climatique, il ne faut pas écarter une éventuelle recrudescence du phénomène de migration dunaire, du fait de la déstabilisation de versants dunaires jusqu'à présent stabilisés, lors de périodes de sécheresse plus prononcées et/ou de non adaptation des formations végétales à des conditions climatiques extrêmes ou encore du fait d'exposition à des conditions hydrodynamiques nouvelles. L'impact du changement climatique n'est pas à étudier systématiquement, excepté dans les cas où l'évolution des phénomènes ci-dessus serait connue.

2.3.3 - Caractérisation de l'aléa de référence

La zone soumise à aléa migration dunaire est celle de la progression du front de dune à échéance 100 ans, à laquelle est ajoutée l'impact d'un événement tempétueux majeur. Cette zone est déterminée selon des principes similaires au recul du trait de côte et est définie de la manière suivante :
Lr = 100Tx + Lmax
Avec Lr la largeur de la zone d'aléa (en m)
Tx le taux de migration annuel (en m/an)
Lmax la valeur de l'avancée du front dunaire consécutive à un événement ponctuel majeur (en m)
La zone soumise à aléa n'est donc pas définie uniquement par une projection des tendances passées.

2.3.4 - Qualification de l'aléa

Il existe un seul niveau d'aléa migration dunaire, l'aléa fort.

2.3.5 - Résultats attendus

Les résultats obtenus par les différentes investigations réalisées sont consignés dans un rapport d'étude récapitulant :

- la liste des données et informations mobilisées,
- les méthodologies employées et la justification des hypothèses,
- les analyses menées,
- les résultats.

Un cahier des cartes de synthèse (du 1/5 000 au 1/10 000) est établi. Il comprend :

- une carte reprenant les différentes positions du front dunaire disponibles, les différentes positions du trait de côte disponibles, les ouvrages de protection, les secteurs de comportement homogène, les vitesses d'évolution de la dune (côté terre) et éventuellement de l'évolution de l'étendue (surface) de celle-ci,
- une carte de l'aléa migration dunaire de référence.

2.4 - Aléa submersion marine

2.4.1 - Définition de la submersion marine

Les submersions marines sont des inondations temporaires de la zone côtière par la mer lors de conditions météorologiques et océaniques défavorables (basses pressions atmosphériques et fort vent d'afflux agissant, pour les mers à marée, lors d'une pleine mer) ; elles peuvent durer de quelques heures à quelques jours.

Trois modes de submersion marine sont distingués :

- submersion par débordement, lorsque le niveau marin est supérieur à la cote de crête des ouvrages ou du terrain naturel (cf. Illustration 27),
- submersion par franchissements de paquets de mer liés aux vagues, lorsque après déferlement de la houle, les paquets de mer dépassent la cote de crête des ouvrages ou du terrain naturel (cf. Illustration 28),
- submersion par rupture du système de protection, lorsque les terrains situés en arrière sont en dessous du niveau marin : défaillance d'un ouvrage de protection ou formation de brèche dans un cordon naturel (cf. Illustration 29), suite à l'attaque de la houle (énergie libérée lors du déferlement), au mauvais entretien d'un ouvrage, à une érosion chronique intensive, au phénomène de surverse, à un déséquilibre sédimentaire du cordon naturel, etc.

Illustration 27 : Submersion par débordement à Leucate le 17 décembre 1997 (11) (Photo DREAL Languedoc-Roussillon)

Illustration 28 : Submersions par franchissement par paquets de mer à Malo-les-Bains (59) le 10 février 2009 (Photo : Jean-Jacques Vynck) et à Ault (80) le 16 mars 1914 (Source : Conseil Général de la Somme)

Illustration 29 : Brèches dans le cordon dunaire de la Dune d'Aval à Wissant (62) le 26 février 1990 (Photo : Olivier Beaulieu) et dans une digue de l'estuaire de la Gironde (Photo : groupe Géotechnique, Risques et Bâtiments du LRPC de Bordeaux – 4 mars 2010)

D'autres aléas accompagnent la submersion marine. Il s'agit principalement des effets de dissipation d'énergie des phénomènes marins induisant des chocs mécaniques pouvant être extrêmement violents.

Le choc des vagues peut ainsi être considéré comme un aléa à part entière. Son impact est distinct d'une inondation et est lié à la pression exercée par l'impact des vagues sur les structures (cf. Illustration 30).

Illustration 30 : Effets des chocs de vagues à Fouras (17) lors de la tempête Xynthia (Source : ARTELIA)

L'arrivée brutale des eaux à terre peut elle aussi être génératrice de choc violent. Elle peut être engendrée par une surverse ou une rupture d'ouvrage. Ce phénomène est particulièrement rencontré :

- en arrière immédiat des ouvrages de protection contre les submersions,
- au-delà de celles-ci dans les zones d'écoulement préférentiel.

2.4.2 - Démarche générale

La démarche de caractérisation de l'aléa submersion marine, c'est-à-dire sa transcription spatiale pour un événement de référence donné, s'appuie sur les éléments issus de l'analyse du fonctionnement du littoral (voir cahier technique dédié à ce sujet). Elle se décompose en trois étapes (cf. Illustration 31) :

1. Détermination des scénarios étudiés et de leurs caractéristiques

Les événements météo-marins sont caractérisés d'une part, par leur intensité et probabilité, et, d'autre part, par leur échéance (actuelle ou à 100 ans, permettant d'inclure l'impact du changement climatique). **Pour la caractérisation de l'aléa submersion marine, l'événement naturel de référence sur un secteur homogène est un événement centennal ou un événement historique si celui-ci est supérieur.** Dans certains cas particuliers, plusieurs événements naturels de référence peuvent être retenus à l'échelle du bassin d'étude des aléas (cf. choix de l'événement de référence 2.4.3), lorsque les différents points d'entrée d'eau dans le bassin sont soumis à des conditions hydrauliques très diverses (variations de l'exposition de la côte, estuaires…).

La détermination d'un scénario de référence nécessite d'établir des hypothèses sur la prise en compte des structures jouant un rôle de protection.

2. Choix de la méthode de caractérisation

La méthode de caractérisation est la méthode mise en œuvre pour connaître les caractéristiques de la submersion à terre (hauteur d'eau, vitesse d'écoulement, vitesse de montée des eaux…) pour des scénarios donnés.

3. Qualification de l'aléa submersion marine

L'aléa submersion marine est qualifié de faible à très fort selon les caractéristiques de la submersion.

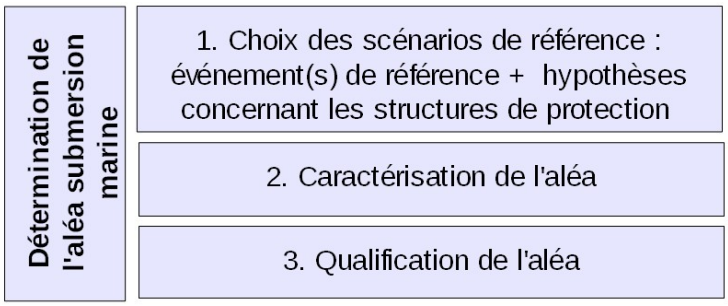


Illustration 31: Étapes composant la détermination d'un scénario de référence

Les principaux points d'attention de chaque étape (cf. Illustration 32) sont décrits dans les paragraphes suivants.

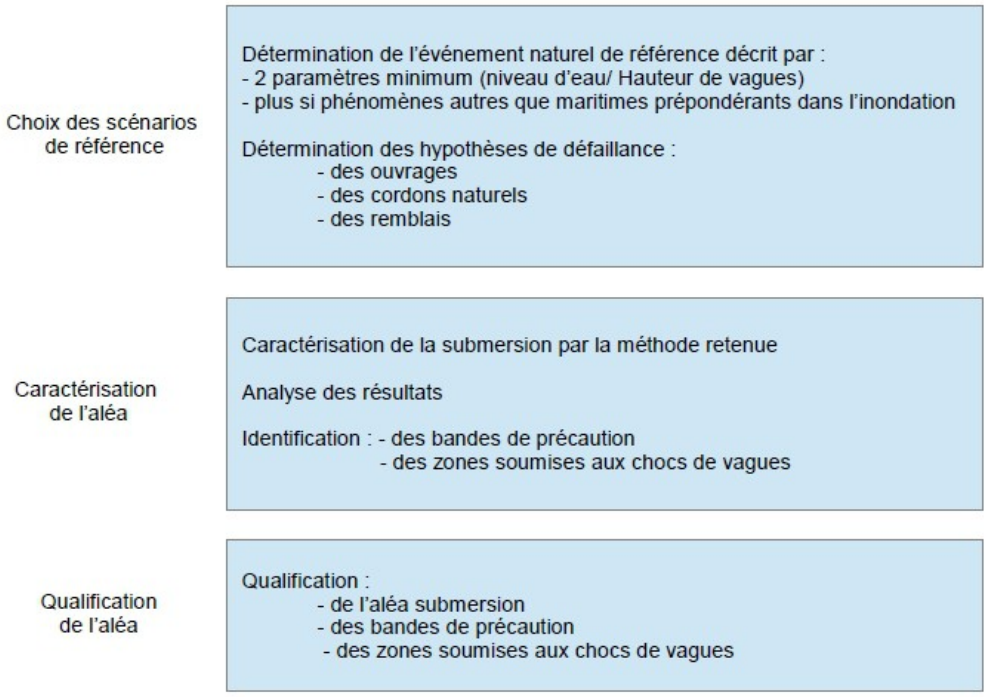


Illustration 32: Démarche d'analyse de l'aléa submersion marine

2.4.3 - Détermination des scénarios étudiés et de leurs caractéristiques

2.4.3.a - Scénario de référence et autres scénarios étudiés

Un scénario est un enchaînement d'événements naturels, considéré à l'échelle du bassin d'étude des aléas. Pour la submersion marine, plusieurs hypothèses composent donc le scénario. **L'événement naturel de référence et les hypothèses de prise en compte des structures jouant un rôle de protection** (ouvrages de protection et structures naturelles telles que cordons dunaires ou cordons de galets par exemple) **constituent ce scénario de référence**. Le choix des hypothèses concernant le comportement des structures jouant un rôle de protection face à un tel événement est réalisé en fonction de l'événement naturel de référence.

Dans le cadre de l'élaboration du PPRL, pour la caractérisation cartographique de l'aléa submersion marine, les scénarios suivants sont étudiés et font l'objet de cartographies :

- **scénario de référence** : déterminé à partir de l'événement naturel de référence (intégrant une élévation du niveau moyen de la mer liée à l'impact du changement climatique à court terme) et d'hypothèses sur les structures de protection, aboutissant à la cartographie de l'aléa de référence,
- **scénario à échéance 100 ans** : déterminé à partir de l'événement de référence prenant en compte l'élévation du niveau de la mer à échéance 100 ans et des mêmes hypothèses sur les structures de protection que le scénario de référence, aboutissant à la cartographie de l'aléa à échéance 100 ans,
- **scénario en l'absence d'ouvrages** : déterminé à partir de l'événement de référence et une hypothèse de ruine généralisée (cf. prise en compte des ouvrages et de leur défaillance 2.4.3) de l'ensemble des ouvrages de protection, aboutissant à une cartographie à titre informatif.

Trois cartes d'aléa submersion marine sont donc à réaliser dans le cadre du PPRL. Cependant, afin d'optimiser le nombre d'études et les moyens, il peut être utile d'étudier dans le cadre de la même étude, d'autres scénarios, qui ne seront pas utilisés directement dans le cadre de l'élaboration du PPRL mais qui peuvent être utiles à la mise en œuvre d'autres volets de la prévention des risques, l'élaboration de Plans Communaux de Sauvegarde (PCS) notamment. Les scénarios suivants peuvent ainsi être étudiés :

- un scénario basé sur un événement fréquent, de forte probabilité,
- un scénario extrême, basé sur un événement extrême, de faible probabilité, supérieur à l'événement de référence.

Ces deux scénarios sont introduits par la directive européenne relative à la gestion des inondations. La cartographie de ces deux scénarios peut cependant être utile même en dehors des « Territoires à Risque d'Inondation ». Pour les méthodes d'estimation de ces scénarios supplémentaires, on se référera aux recommandations pour l'application de cette directive. Les cartes, produites sur la base de ces scénarios, le sont uniquement à titre informatif dans le cadre du PPRL.

2.4.3.b - Phénomènes naturels à l'origine de l'inondation

Le phénomène naturel initiateur d'une submersion marine est d'origine météorologique (passage dépressionnaire ou cyclonique) et entraîne des conditions météo-marines défavorables. Ce phénomène se manifeste en un lieu géographique donné et est limité dans le temps.

L'événement marin est défini à partir de plusieurs caractéristiques (niveau marin, hauteur, direction et période des vagues, intensité et direction du vent, etc.) rendant compte des différents phénomènes météo-marins. Il est caractérisé par deux paramètres au minimum, le niveau d'eau et la hauteur significative des vagues, conditionnant les volumes d'eau entrants.
Le **niveau d'eau**, intègre, au niveau moyen de la mer, l'effet de la marée et de la surcote météorologique (mais pas l'effet des vagues).
Le niveau marin, calculé à la côte, intègre l'effet des vagues sous la forme de la surcote liée aux vagues (wave set-up). Le niveau marin de référence est calculé à pleine mer pour les littoraux à marée.

Une submersion peut avoir pour origine plusieurs phénomènes qui ne sont pas uniquement maritimes. La définition de l'aléa submersion marine doit prendre en compte les concomitances éventuelles des différentes sources possibles d'inondation : submersions par la mer, débordements de cours d'eau, ruissellements, remontées de nappe, accumulations dues aux pluies… Les volumes d'eau déjà présents au début d'un événement de référence, d'origine marine ou non, sont donc à évaluer. Dans les estuaires et les lagunes, une étude des concomitances entre les niveaux marins hauts et les débits fluviaux est nécessaire (cf. Encart 12).

Le choix des phénomènes naturels à prendre en compte dans l'événement naturel de référence se fait sur la base de l'analyse du site et des événements historiques.

Encart 12 : Submersion d'origines multiples : l'exemple de Palavas lors de la tempête de 1997 (CETE Méditerranée)

Les mesures disponibles lors de la tempête de 1997 sur les étangs palavasiens montrent des phénomènes de concomitances de montée de niveaux des eaux par submersion marine et ensuite par apports des cours d'eau. Les étangs de l'Arnel et du Prévost d'un côté du Lez et du Méjean de l'autre sont séparés de la mer par un lido. Le canal du Rhône à Sète sépare l'étang de l'Arnel et du Prévost. La Mosson dispose d'un ouvrage de décharge en cas de crue vers l'Arnel (cf. Illustration 33).

Des données fiables des niveaux d'eau mesurés en NGF au Port de Sète (données horaires) et dans les étangs de l'Arnel et de Prévost (toutes les 15 minutes), provenant de la DREAL Languedoc-Roussillon, sont disponibles (cf. Illustration 34 - 1er graphique).

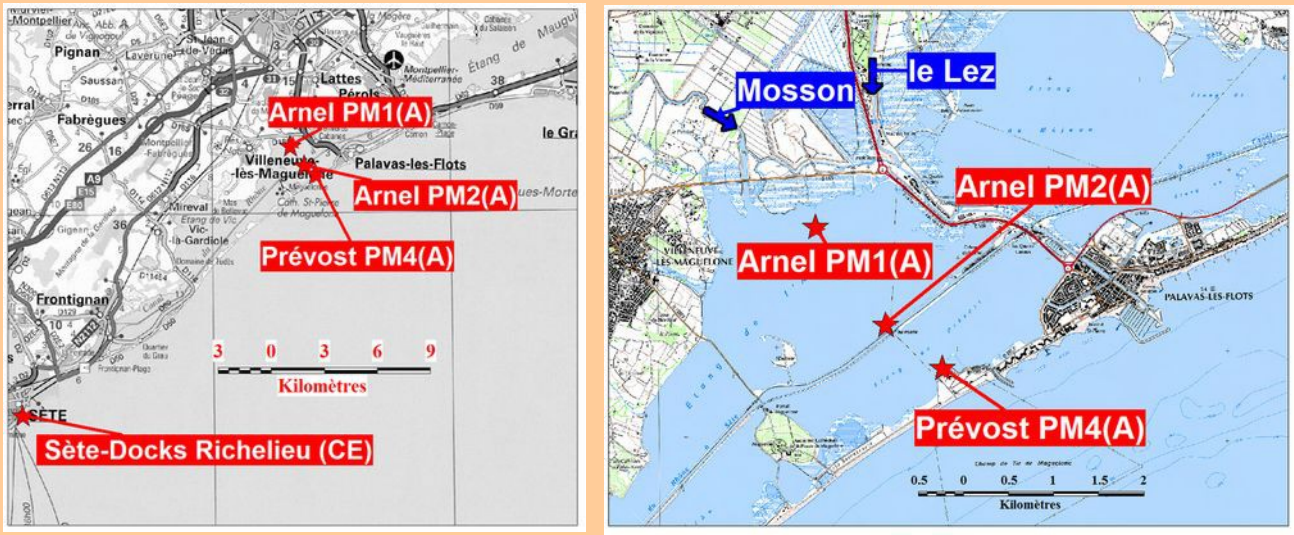


Illustration 33 : Plans de situation des étangs palavasiens (fond de plan : Scan 25® IGN)

La banque Hydro fournit le débit instantané sur La Mosson (cf. Illustration 34 - 3ème graphique) ainsi que les débits moyens journaliers sur la Mosson et le Lez (cf. Illustration 34 - 4ème graphique). La houle est fournie à titre indicatif pour montrer qu'elle n'intervient pas dans la démonstration (cf. Illustration 34 - 2ème graphique).

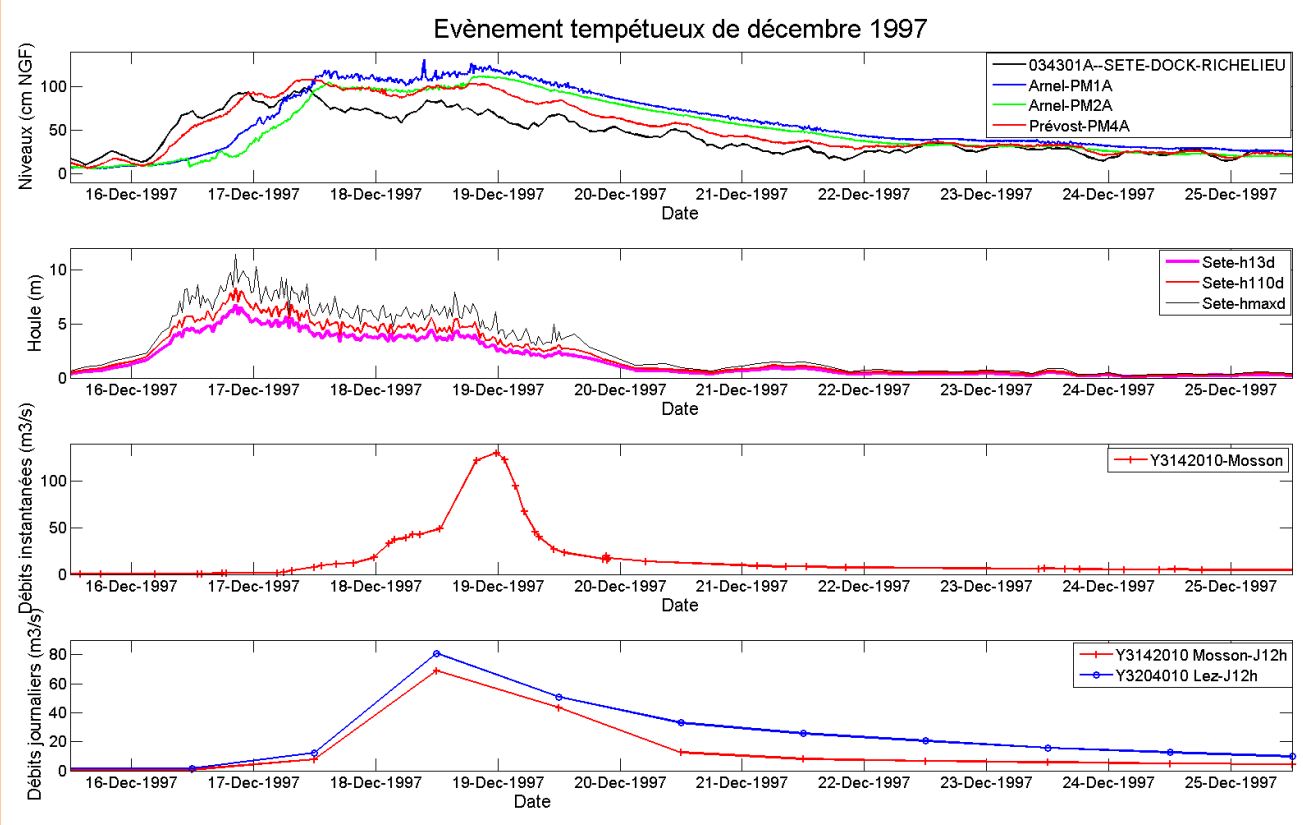


Illustration 34 : Évolution entre 15 et le 25 décembre 1997 des niveaux marins horaires (cm NGF) à Sète (graphique 1), des conditions de houles (m) à Sète (graphique 2), du débit instantané (m^3/s) de la Mosson (graphique 3) et des débits moyens journaliers (m^3/s) de la Mosson et du Lez (graphique 4)

Le niveau dans l'étang du Prévost (PM4A) monte de manière quasi-synchrone avec le niveau dans le port de Sète (20 km). Un léger décalage pourrait être attribué au référentiel de temps utilisé, TU, temps universel. Ensuite, les niveaux dans l'étang de l'Arnel (PM1A et PM2A) montent avec un retard imputable aux levées du canal du Rhône à Sète pour atteindre un niveau équivalent, voir supérieur, à celui du Prévost pourtant plus proche de la mer.

Une stagnation ou légère baisse de niveau s'amorce dans les étangs, liés à une baisse du niveau marin dans la matinée du 18 décembre. Une remontée lente s'opère ensuite, uniquement liée aux apports fluviaux de la Mosson et probablement du Lez, indirectement connecté aux étangs de l'Arnel et du Prévost. Les pics de débits de crue du Lez et de la Mosson sont complètement synchrones.

La chute rapide du niveau de la Mosson entraîne une baisse quasi-instantanée des niveaux dans les étangs, ce qui montre que ce deuxième pic de niveaux dans les étangs est entièrement contrôlé par les apports fluviaux. La vidange s'effectue par l'étang le plus proche de la mer, le Prévost, et ensuite par celui le plus éloigné, l'Arnel, le niveau d'eau étant plus élevé de l'amont vers l'aval.

Lors de cet événement, deux pics de niveaux identiques sont présents, le premier, lié à la submersion marine, et le second contrôlé, par les apports fluviaux. La partie arrière de Palavas ou du canal du Rhône à Sète a donc été autant impactée par les apports des cours d'eau que par la submersion marine. La photographie ci-dessous (cf. Illustration 35) prise en 2003 illustre cette difficulté de séparation de phénomène maritime ou fluvial.

Illustration 35 : Secteur de Palavas-les-Flots (34) en 2003 (Photo : DREAL Languedoc-Roussillon)

2.4.3.c - Choix de l'événement naturel de référence

1 Généralités

L'événement naturel de référence est l'événement historique majeur s'il est supérieur à un événement de période de retour 100 ans. Par défaut, c'est l'événement théorique de période de retour 100 ans. **Il est caractérisé par deux paramètres au minimum, le niveau d'eau et la hauteur significative des vagues.** Ces

paramètres sont définis au large mais leur caractérisation à la côte est nécessaire, notamment pour le niveau marin. L'événement retenu est l'événement le plus pénalisant en termes de submersion, ce qui revient à dire le plus pénalisant en termes de volumes entrants. Les volumes d'eau entrants sont liés aux trois modes de submersion : le débordement, le franchissement par paquets de mer et la rupture. La rupture peut être considérée comme un débordement particulier, pour lequel la cote du seuil varie dans le temps.

Le volume entrant total est la somme des volumes entrants par débordement *d*, liés au niveau marin total, et des volumes entrants par franchissements par paquets de mer *f* : $V = V(d) + V(f)$

Dès que les volumes d'eau apportés par les débordements sont significatifs par rapport aux franchissements, les volumes entrants dépendent principalement du niveau marin et l'événement de référence retenu est défini par comparaison des niveaux marins des événements historiques et centennaux étudiés en retenant le plus haut (cf. 2.4.3.c - 2). Dans le cas où les franchissements ne sont pas négligeables, les volumes franchissants associés à l'événement de référence retenu (couple niveau d'eau et hauteur de vagues) peuvent être calculés et intégrés pour l'élaboration de la carte d'aléa.

Lorsque les volumes d'eau apportés par les débordements ne sont pas significatifs, les volumes d'eau entrant proviennent des franchissements et des débordements qui dépendent tous deux du niveau d'eau et de la hauteur significative des vagues. Une démarche spécifique doit alors être mise en œuvre (cf. 2.4.3.c - 4).

2 Définition du niveau marin de référence

Démarche générale

Par définition, **on appelle niveau d'eau** le niveau « au large » intégrant au niveau moyen de la mer, l'effet de la marée et de la surcote météorologique (mais pas l'effet des vagues). Il est noté z_0.
On appelle niveau marin, le niveau marin à la côte intégrant au niveau moyen de la mer, l'effet de la marée, de la surcote météorologique, la surcotes liées aux vagues et tout autre phénomènes nécessitant d'être pris en compte.

Le niveau marin intègre au niveau moyen de la mer :

- le niveau de marée,
- la surcote météorologique,
- la surcote liée aux vagues (cf. Encart 14),
- tout autre phénomène nécessitant d'être pris en compte et connu (exemple : seiche côtière),
- une marge de sécurité permettant de prendre en compte les incertitudes (définie par le bureau d'étude en charge de l'élaboration du PPRL).

Pour intégrer la surcote liée aux vagues à la côte, deux paramètres sont nécessaires : le niveau d'eau, intégrant, au niveau moyen de la mer, l'effet de la marée et de la surcote météorologique (mais pas l'effet des vagues) z_0, et les vagues de hauteur significative *Hs* à l'origine de la surcote liée aux vagues calculée à la côte (wave set-up *zs*).
$Z = z_0 + f(Hs) = z_0 + zs$

Le niveau marin à la côte de chaque événement naturel est défini à partir du couple niveau d'eau/hauteur de vagues (z_0, *Hs*).

Encart 13 : Les types de données disponibles pour définir le niveau marin à la côte

Les marégraphes, situés dans les ports, n'enregistrent qu'une faible partie de la surcote liée aux vagues, cette dernière pouvant être importante à l'extérieur des ports. En faisant l'hypothèse sécuritaire que les observations marégraphiques n'intègrent pas la composante de surcote liée aux vagues (cf. Encart 14), les mesures marégraphiques permettent de déterminer z_0 pour des événements historiques ou centennaux. Ainsi, on considère que les marégraphes mesurent le niveau d'eau. Dans le cas d'événements centennaux, les analyses des niveaux extrêmes aux points de mesures et leurs interpolations entre les points de mesure peuvent être utilisées. En Atlantique-Manche, il pourra ainsi être fait référence à l'étude « Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique) » (SHOM-CETMEF, 2013). En dehors des ports de référence, une analyse complète des niveaux marins (recherche d'observations ou de mesures de niveaux hauts historiques, analyse des phénomènes composant le niveau marin...) est cependant recommandée.

Des formules empiriques permettent de donner une première estimation de la surcote liée aux vagues. Des modèles numériques doivent être mis en œuvre si cette composante est prédominante (cf. Encart 14). Les mesures de vagues au large ou, à défaut, des données numériques issues de modélisation peuvent être utilisées pour leur mise en œuvre. Il est en effet recommandé de privilégier les mesures in-situ, lorsqu'elles sont disponibles, plutôt que des données issues de modélisation numérique qui ont l'avantage de leur couverture spatiale mais dont les incertitudes sur les résultats restent importantes (de l'ordre de 20%, dans le sens d'une sur-estimation comme d'une sous-estimation).

En Outre-mer, les observations marégraphiques sont moins nombreuses et les périodes d'observation plus courtes. Ces éléments et la faible fréquence des cyclones ne permettent pas de disposer de statistiques des niveaux d'eau extrêmes. La connaissance des extrêmes est approchée de manière déterministe. Le recours à la simulation numérique de multiples trajectoires « probables » de cyclones est souvent nécessaire pour bien appréhender les extrêmes (cf. Encart 25). Elle permet de déterminer les surcotes météorologiques et de propager les houles cycloniques à la côte pour estimer la surcote liée aux vagues, le set-up, et les volumes franchissants. Les données historiques restent cependant la première source d'information.

Dans le cas d'un événement historique, le couple (z_0, Hs) définissant l'événement peut être retrouvé de plusieurs manières. Des observations visuelles du niveau marin Z peuvent exister. Ce niveau peut également être obtenu par $Z = z_0 + f(Hs)$, lorsque des enregistrements marégraphiques et houlographiques ou des résultats de modélisations fiables de ces événements sont disponibles à proximité du site d'étude. Les hauteurs de vagues considérées sont celles observées pendant l'événement.

Dans les cas théoriques d'événements centennaux, la période de retour associée à un niveau marin Z n'est pas définie par un seul couple (z_0, Hs) mais par l'ensemble des couples (z_0, Hs) possibles qui permettent d'atteindre ce niveau. En effet, un événement étant décrit par un couple de 2 paramètres, le niveau d'eau et la hauteur significative des vagues, plusieurs couples de même probabilité d'occurrence peuvent générer des niveaux marins différents. Un couple comprenant un niveau d'eau élevé et des vagues de faible amplitude peut en effet avoir la même probabilité qu'un couple comprenant un niveau d'eau moins élevé mais une hauteur de vagues plus importante.

Des estimations préalables des extrêmes des niveaux d'eau z_0 et des vagues Hs sont nécessaires avant le calcul des niveaux marins extrêmes à la côte. Les études existantes pourront être exploitées. Des analyses des extrêmes pourront également être réalisées. Dans tous les cas, une attention particulière est à apporter à la représentativité de l'échantillon et à l'ajustement statistique. La borne haute de l'intervalle de confiance peut être à privilégier. Pour l'analyse des extrêmes, il peut être fait référence au document « Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes – Environnements maritime et estuarien » (CETMEF, 2013).

La détermination des caractéristiques de l'événement à la côte, comme le niveau marin, peut par exemple reposer sur une méthode simplifiée d'analyse des concomitances (CIRIA, CUR, CETMEF, 2009 ; DEFRA, 2005, CETMEF, 2013). L'application de cette méthode repose sur la détermination d'un facteur de dépendance entre vagues et niveau d'eau. Pour définir ce facteur, il peut être fait référence au document « Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes – Environnements maritime et estuarien » (CETMEF, 2013). Cette méthode, applicable en métropole sur les côtes Manche et Atlantique, facile à mettre en œuvre, permet de déterminer les couples (z_0, *Hs*) de période de retour conjointe centennale et le niveau marin total *Z* associé obtenu par l'addition du niveau d'eau sans prise en compte de l'action des vagues (z_0) et de la surcote liée aux vagues (*zs*). Sa mise en œuvre peut différer suivant les spécificités des secteurs. Des méthodes complètes d'analyse des concomitances existent également (DEFRA, 2005 ; BRGM, 2012). Ces méthodes rigoureuses sont préférables lorsque les données disponibles le permettent. En Méditerranée, une dépendance complète est à privilégier (CETMEF, 2013).

Encart 14 : Surcote liée aux vagues : origine et évaluation (ARTELIA)

Ce processus est largement dépendant, d'une part, du profil des fonds de l'avant-plage et du type de trait de côte et, d'autre part, de la cambrure des vagues incidentes. Il est donc recommandé de rechercher au préalable les configurations et conditions les plus défavorables avant d'appliquer les méthodes décrites ci-après. Un exemple d'une telle recherche est fourni par Stephens et al. (2011).

Interactions vagues/côte

En hydrodynamique littorale, on distingue essentiellement trois situations d'interaction entre les vagues et la côte :

- condition réflexive : les vagues de faible cambrure se propageant sur de fortes pentes ne déferlent pas mais se réfléchissent au niveau du trait de côte formant un clapotis partiel avec une période égale à la période des vagues incidentes ;
- condition dissipative : les vagues de forte cambrure se propageant sur de faibles pentes déferlent intensément engendrant un transfert d'énergie depuis leur fréquence primaire (période de pic de l'état de mer) vers les basses fréquences (ondes basses fréquences libres) ainsi qu'une surélévation du niveau moyen de la mer (surcote) ;
- situation intermédiaire : entre ces deux cas, différentes configurations morphodynamiques (présence de barres et autres formes sédimentaires), donnant des situations mixtes, peuvent s'observer également du fait de la variation de la pente de l'avant-plage, de la plage et de la dune ou de l'ouvrage.

Dans le cas des littoraux rocheux ou artificialisés, on se trouve plutôt dans des situations fortement réflexives avec une surélévation faible du niveau moyen. Pour les littoraux meubles, le diamètre du sédiment va jouer un rôle important : un sédiment grossier (gravier, galet) va en effet engendrer des situations plutôt réflexives ou mixtes alors qu'un sédiment fin va engendrer plutôt des situations dissipatives. Les situations dissipatives sont celles pour lesquelles la surélévation du niveau moyen induit par les vagues est la plus importante. On peut ainsi observer sur des plages des surélévations supérieures à celles mesurées au marégraphe d'un port voisin soumis aux mêmes conditions de houle car le port est plutôt en situation réflexive.

Formulations simples de la surcote liée aux vagues

Des formulations empiriques simples d'estimation de la surcote sont disponibles au niveau du trait de côte uniquement. Elles sont issues d'essais en laboratoire ou de mesures en nature avec différents procédés. Une compilation de ces mesures est fournie par Dean et Walton (2009). Deux types de formules sont recensés :

- Celles qui relient directement la surcote à la hauteur significative des vagues mesurées, soit au large, soit juste devant la zone de déferlement,
- Celles qui introduisent le nombre d'Iribarren faisant intervenir la pente de la plage, la période des vagues et la hauteur significative.

Ils en retiennent que les formules ne sont pas très utilisables notamment parce que les définitions précises concernant la localisation du point de mesure des conditions de vagues, les profils bathymétriques entre ce point et la côte ainsi que la méthode de mesure de la surcote ne sont pas toujours cohérentes. Ils estiment, à partir des mesures disponibles, que la surcote à la côte est de l'ordre de 0,19+/-0,1 fois la hauteur significative effective au large, ce qui est une large plage de variation puisque l'écart-type est environ la moitié de la moyenne. Ils expliquent qu'elle dépend beaucoup de la pente et de la configuration de l'avant-plage sur laquelle les vagues déferlent.

En première approche, les formules empiriques, comme celle de Stockdon *et al.* (2006) peuvent être utilisées. Cette formule n'est cependant valable que pour certaines configurations de plages naturelles comme l'ont analysé Laudier *et al.* (2011). Les deux formules de Hanslow et Nielsen (1992) reprises dans le Guide Enrochement (traduction française du Rock Manual, 2009) peuvent également être signalées.

Les logiciels de calcul

Les formules empiriques, simples d'utilisation, sont à privilégier. Cependant, dans les cas où les conditions du site, trop complexes, ne permettent pas de les utiliser mais sont néanmoins bien connues, des logiciels de calcul, dont la mise en œuvre nécessite de nombreuses données et peut être longue, peuvent être utilisés. Les logiciels de calcul de propagation des états de mer du large vers la côte incluant le déferlement par les fonds sont susceptibles d'estimer plus finement la surcote liée aux vagues en mode stationnaire. En mode instationnaire, ils peuvent être couplés à des modèles hydrodynamiques pour estimer la surcote et la circulation littorale. L'avantage de ces modèles est, d'une part, qu'ils prennent en compte de manière assez fine le processus de déferlement conduisant à la surcote et, d'autre part, que cette surcote est estimée tout le long du profil bathymétrique et pas seulement au niveau du trait de côte.

On distingue les modèles 2D de propagation le long d'un profil de plage et les modèles 3D prenant en compte une bathymétrie complexe. L'avantage des modèles 2D est leur grande facilité de mise en œuvre et de validation à partir de mesures d'une part, et une bonne prise en compte de l'irrégularité du profil bathymétrique sur l'ensemble de la zone de déferlement et sur la plage dans le calcul à condition de disposer de mesures bathymétriques fiables, d'autre part. De tels exemples de modèle 2D ont été développés par Hamm (1995), Goda (2008), SWAN team (2011), Stephens *et al.* (2011) et Filipot et Cheung (2012).

Prise en compte du changement climatique dans le niveau marin

La question de la vulnérabilité des territoires et de son évolution dans le temps revêt un caractère crucial dans les zones littorales au regard de l'accroissement démographique attendu et de l'impact prévisible fort du changement climatique sur la configuration des côtes basses. Par conséquent, il convient de prendre dès maintenant les mesures nécessaires pour limiter la vulnérabilité future des territoires au risque de submersion marine face à l'augmentation prévisible du niveau marin sur le littoral français.

Le guide méthodologique de 1997 préconisait déjà de prendre en compte l'augmentation du niveau moyen de la mer à l'échéance cent ans pour les zones à fort enjeu. Cette mesure doit désormais être étendue à l'ensemble des PPRL. L'échéance pour la prise en compte de l'impact du changement climatique reste de 100 ans. Elle est notamment pertinente au regard de l'échelle temporelle en matière d'urbanisme, la plupart des constructions ayant une durée de vie moyenne de cent ans (le taux de renouvellement du parc immobilier en France est de 1%).

Le PPRL doit donc comprendre deux cartes d'aléa submersion marine distinctes, l**'aléa de référence du PPRL et un aléa à échéance 100 ans**.

Les événements retenus pour la détermination de l'aléa de référence, aléa à court terme, intègrent au niveau moyen de la mer une marge d'élévation du niveau de la mer de 20 cm. Pour la détermination de l'aléa à échéance 100 ans, l'hypothèse retenue est celle d'une augmentation du niveau moyen de la mer, égale à 60 cm dont 20 cm sont déjà intégrés au niveau d'eau de l'événement de référence. Il s'agit ici d'une position de base

qui peut, si besoin, être affinée par des études locales plus précises permettant d'évaluer l'impact local du changement climatique, notamment en outre-mer.
Les variations altimétriques de la croûte terrestre (subsidence/surrection) (cf. cahier technique) peuvent également être prises en compte dans le scénario à échéance 100 ans si leur ampleur le nécessite.

A ce jour, les valeurs d'élévation du niveau moyen de la mer correspondent aux prévisions du GIEC, reprises par l'ONERC. Ces hypothèses de prise en compte du changement climatique seront donc évolutives en fonction de l'avancée des travaux scientifiques en la matière afin de retenir les dernières données disponibles arrêtées par le ministère.

Prise en compte des incertitudes dans le niveau marin

De nombreuses incertitudes concernent l'événement de référence : variations altimétriques de la croûte terrestre, précision de la mesure marégraphique, filtrage ou mauvaise retranscription de phénomènes du fait de la période d'acquisition des marégraphes (cf. Encart 15), précision des données de vagues, numériques (type ANEMOC) ou issues de mesures, précision des extrapolations statistiques (choix du modèle statistique, intervalle de confiance lié à la durée d'observation…), interpolation des niveaux extrêmes entre les points de mesure, évaluation de la surcote liée aux vagues… Ces incertitudes concernent chaque étape des analyses à mener.
A titre d'exemple, les incertitudes des données numériques de vagues peuvent mériter une étude de sensibilité du fait de l'impact potentiellement non négligeable sur le calcul du niveau marin total incluant la surcote liée aux vagues.

Encart 15 : Exemple d'incertitude - Prise en compte des fluctuations du niveau marin

Les mesures marégraphiques sont généralement moyennées sur quelques minutes. Cependant les niveaux instantanés peuvent varier bien plus fortement (cf. Illustration 36 et Illustration 37). Ces fluctuations (écarts types), dépendant du site d'étude, doivent être prises en compte dans le niveau marin si nécessaire (analyse des ordres de grandeurs en conditions normales et en conditions de tempête, modélisation si nécessaire).

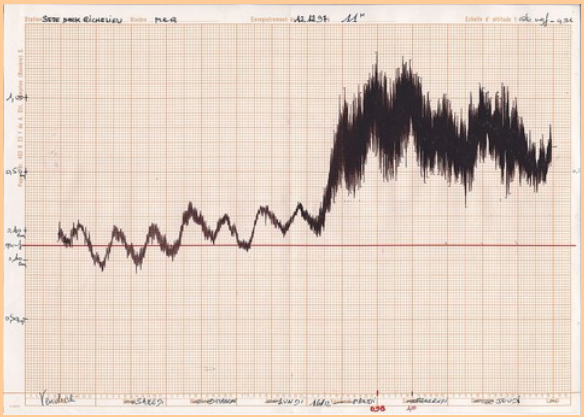


Illustration 36 : Marégramme de la tempête de 1997 à Sète – Dock Richelieu (Source SHOM)

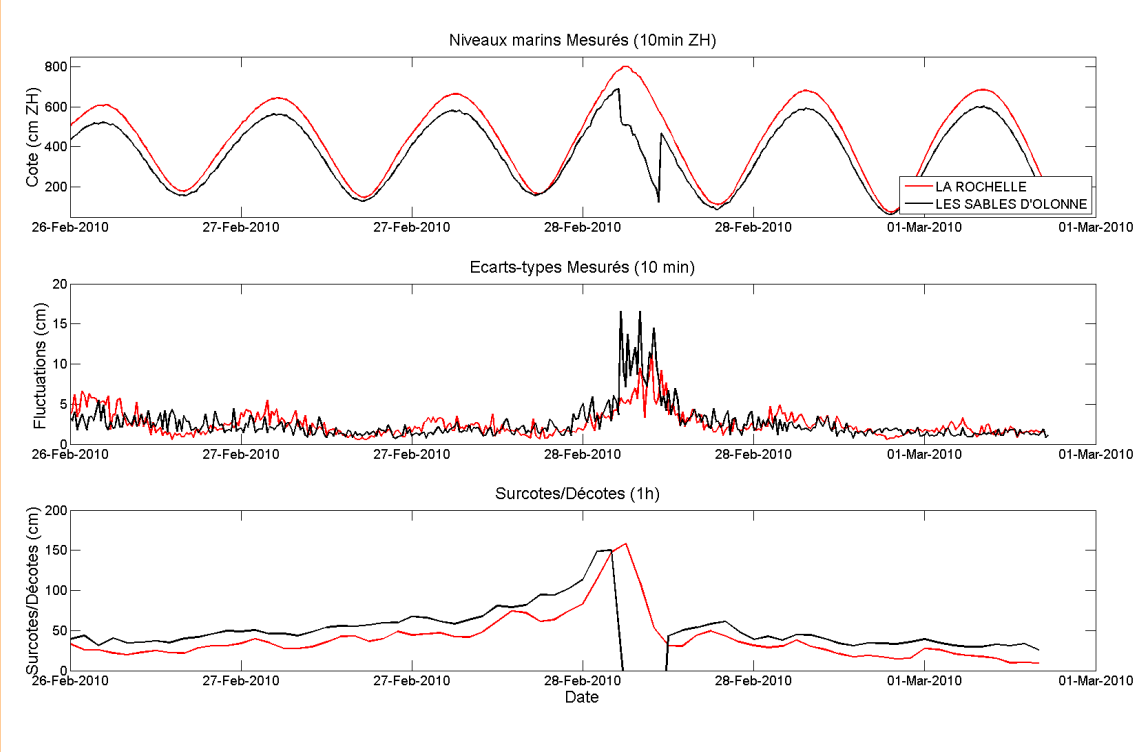


Illustration 37 : Niveaux marins observés, fluctuations du niveau, marées prédites et surcotes observées à La Rochelle et aux Sables d'Olonne du 28 février au 3 mars 2010 (CETE Méditerranée – Données source : SHOM)

Si les incertitudes de certaines méthodes ou données apparaissent trop fortes, ces données peuvent être écartées. **Les incertitudes sont à évaluer et à prendre en compte dans l'estimation du niveau marin de référence. Dans le cas où cette estimation n'est pas possible, une marge de 25 cm est rajoutée au niveau marin de référence** (pour un événement théorique centennal de même que pour un événement historique).
D'une manière générale, en dehors des incertitudes liées au niveau marin de référence, les incertitudes qui pèsent sur chacune des hypothèses prises dans l'ensemble de la démarche doivent être qualifiées et quantifiées si possible.

Prise en compte d'autres phénomènes dans le niveau marin

Sur certains secteurs, certains phénomènes autre que la marée et la surcote liée aux vagues peuvent impacter fortement le niveau marin (seiches cf. encart 16, mascaret, effets de bascule de plan d'eau fermés ou semi-fermés liés au vent (cf. Encart 1), clapots...). Si de tels phénomène sont identifiés, une estimation de leur impact est à réaliser et à intégrer au niveau d'eau de référence si cela est jugé nécessaire.

Encart 16 : Exemple d'incertitude - Prise en compte des seiches

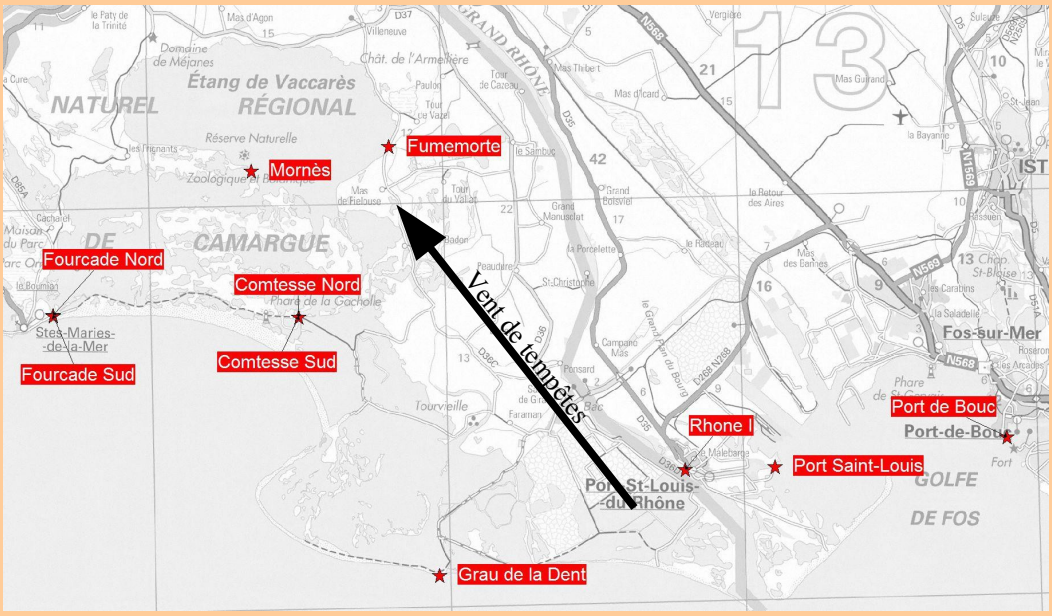
Le calcul des niveaux extrêmes est basé sur l'analyse statistique des données marégraphiques qui ne prennent pas en compte les seiches (filtrées de manière générale par les marégraphes). La méthode proposée ici pour déterminer le niveau marin de référence ne permet pas directement de prendre en compte les variations du niveau liées aux seiches. Ce phénomène, dont la période d'apparition majeure est l'hiver, est majoritairement déclenché par des ondes longues amenées par les houles du large (Devaux, 2009). Les seiches, qui sont donc susceptibles de se produire lors d'événements tempétueux, doivent donc être étudiées spécifiquement sur les secteurs de configuration fermée ou semi-fermée, où elles sont susceptibles de se produire, et doivent être prises en compte sous la forme d'une marge de la valeur des seiches ayant pu être rencontrées.

Encart 17 : Analyse spécifique des secteurs arrière-littoraux : la bascule des plans d'eau des Salins du Midi (CETE Méditerranée)

En fonction de la longueur des plans d'eau sur laquelle le vent agit et de leur orientation, ceux-ci peuvent basculer et/ou un clapot être généré. La tempête de 1982 sur le Golfe du Lion est l'une des plus fortes connues sur ce littoral, avec des vents de l'ordre de 180 km/h maximum. Le phénomène de bascule des plans d'eau a été constaté sur le site d'Aigues-Mortes lors de cet événement (impact du vent sur les zones en eaux et les zones submergées lors de submersions marines).

Une analyse de ce phénomène a été menée dans le cadre d'une étude de connaissances sur la submersion marine pour le compte de la DDTM13 (Pons *et al.*, 2007).

Des mesures de niveaux marins, en particulier au sud des étangs de Camargue ont montré parfois des baisses relativement conséquentes de leur niveau, comme lors du passage de la tempête de novembre 1982. Alors que le passage de la tempête génère une forte surcote météorologique en mer (stations de Port de Bouc, Port Saint-Louis et Grau de la Dent, où l'influence de la marée est bien visible) se propageant dans les stations plus éloignées, les stations se situant au sud-sud-est des étangs montrent des baisses de niveaux en début de tempête comme l'indique les stations de Mornès, de Fumermorte et Comtesse Nord. A la fin de l'événement, des apports importants proviennent du Rhône, caractéristiques de débits importants générés par les pluies de cet événement météorologique.



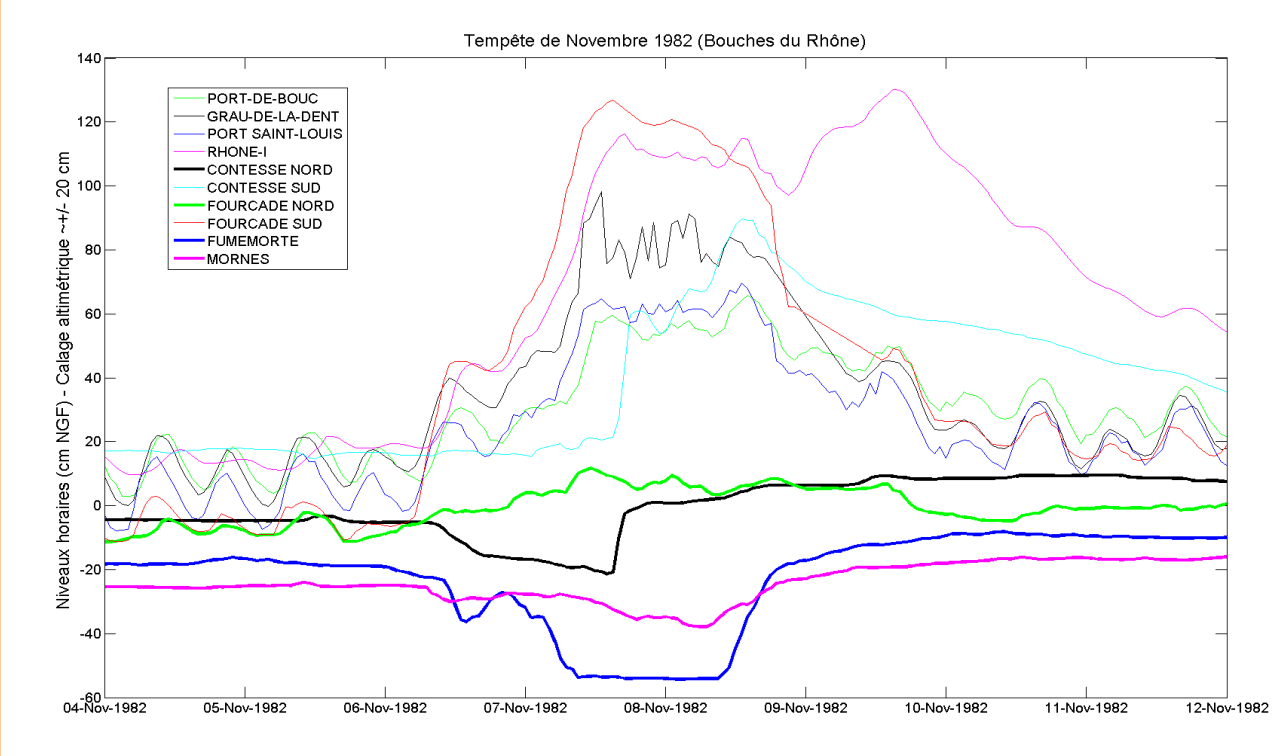


Illustration 38 : Évolution des niveaux d'eau dans les Bouches-du-Rhône lors de la tempête de novembre 1982 (Données sources : Compagnie des Salins du Midi, Grand Port Maritime de Marseille, Réserve Naturelle de Camargue)

Le marégramme

Suivant les méthodes de cartographie de l'aléa retenues (cf. 2.4.4), il peut être nécessaire de connaître l'évolution du niveau marin dans le temps. Plusieurs méthodes sont possibles pour définir cette évolution. Le niveau marin le plus haut atteint est toujours le niveau marin de référence. Le marégramme de référence peut ensuite être défini à partir des méthodes suivantes :

- la forme du marégramme correspond à un marégramme de marée prédite, le niveau marin de pleine mer étant ajusté au niveau marin de référence ;
- une surcote est appliquée sur le marégramme de marée prédite pendant un temps limité. Les méthodes de type intensité/durée/fréquence peuvent être utilisées dans cet objectif (cf. Encart 18).

Encart 18 : Courbes intensité/durée/fréquence et diagramme mono-fréquence : l'exemple de Sète (CETE Méditerranée)

La méthodologie développée dans le cadre de travaux pour la DREAL Languedoc-Roussillon (Lang et Lavabre, 2007) pour le débordement de cours d'eau permet, par analogie entre le débit et la surcote marine, de proposer une forme de marégramme.

En premier lieu, il est utile d'analyser, sur la durée, la période de retour d'une tempête. Le graphique ci-dessous (cf. Illustration 39) montre à Sète les périodes de retour des surcotes horaires pour différentes durées. Il est donc possible de caractériser les trois tempêtes de 1987, 1997 et 2003 par rapport à ces courbes. Par exemple, la tempête de 1997 se situe autour d'une période de retour de 50 ans pour des durées faibles (infé-

rieure à 20h), augmente légèrement sur des durées supérieures (environ entre 20 et 60h) avant de devenir plus faible.

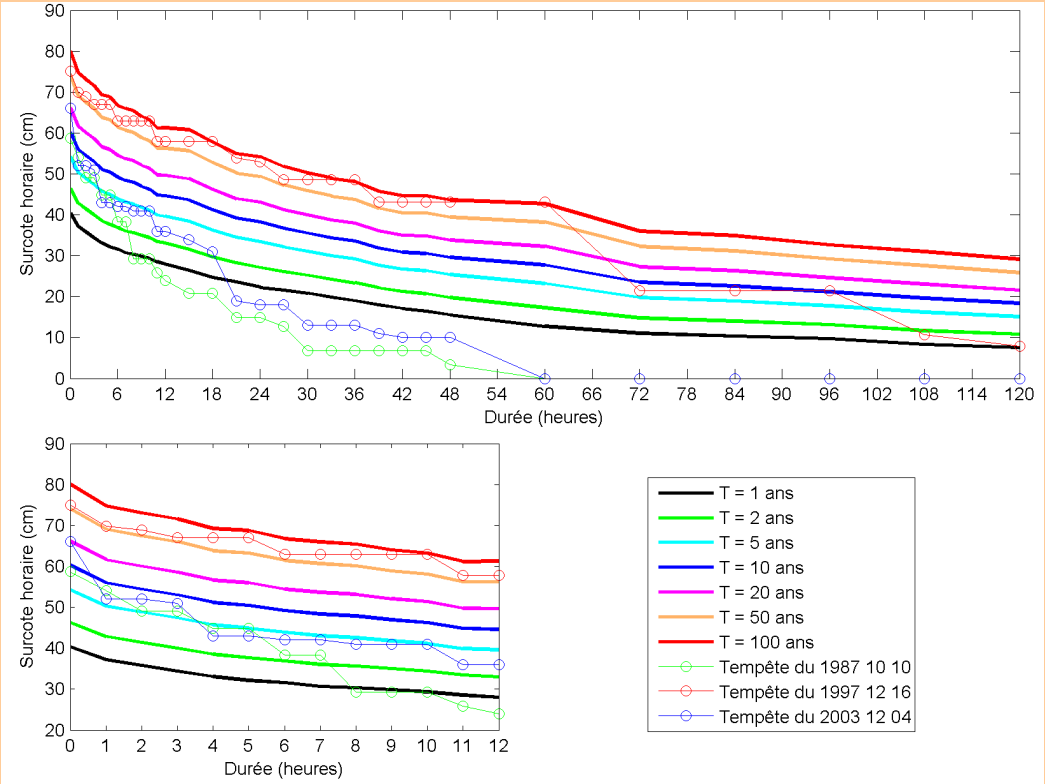


Illustration 39 : Courbe intensité/durée/fréquence des surcotes horaires à Sète et positionnement des tempêtes du 10 octobre 1987, du 16 décembre 1997 et du 4 décembre 2003 par rapport à celles-ci

Une deuxième approche est de définir la forme du marégramme (élévation du niveau plus rapide que la descente…). En hydrologie, une forme triangulaire avec une montée plus rapide est classiquement utilisée. La réalisation de diagrammes moyens normalisés permettent d'apprécier les formes de marégrammes pour les événements les plus forts. Ils sont obtenus en superposant les événements les plus forts, retenus à partir de l'application d'un seuil sur la valeur représentée. Ces diagrammes peuvent être réalisés à partir de données de surcote ou de niveaux marins (cf. Illustration 40).

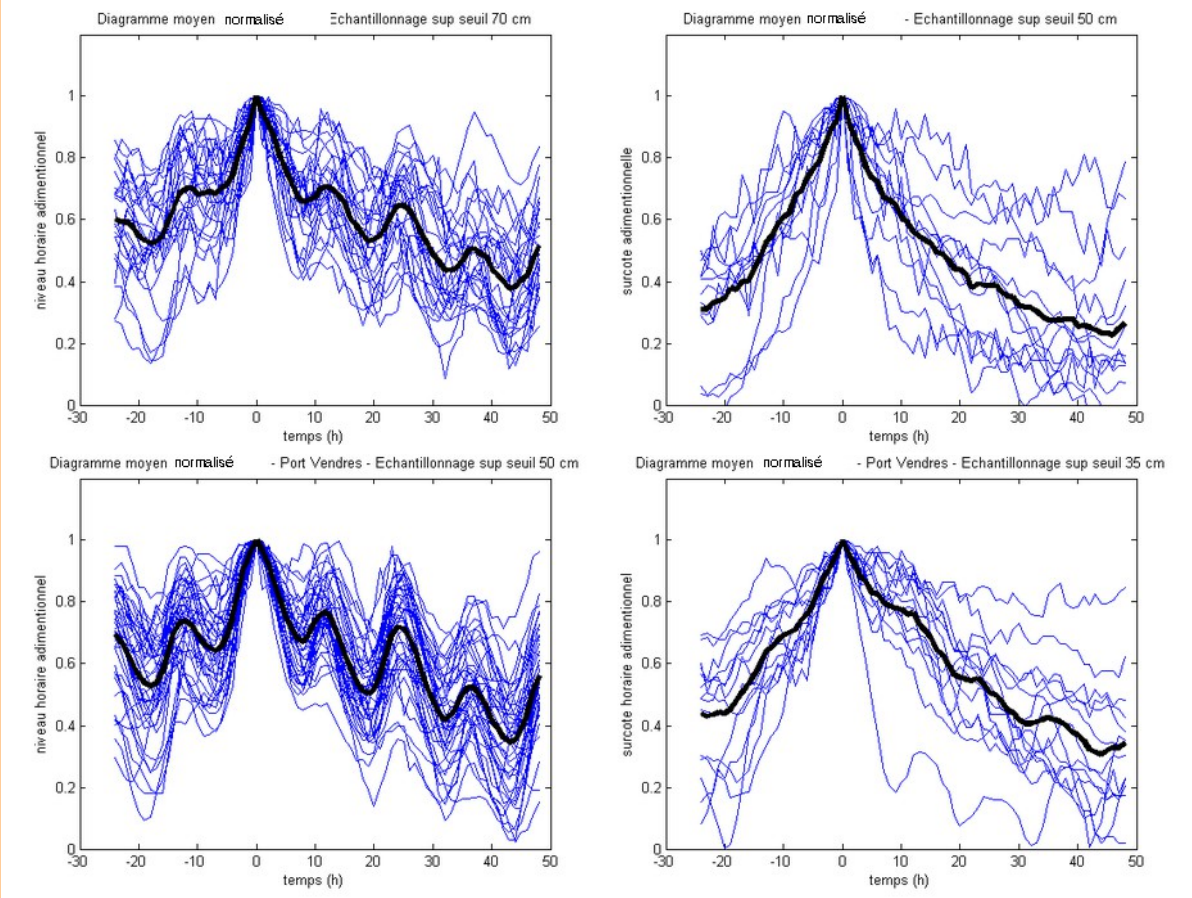


Illustration 40 : Diagrammes moyens normalisés des niveaux marins (à gauche) et surcotes horaires (à droite) à Sète (en haut) et à Port-Vendres (en bas)

Deux approches peuvent ainsi être proposées pour élaborer le marégramme à partir des connaissances sur les surcotes. Le marégramme peut reposer sur :

- la surcote synthétique monofréquence qui s'appuie sur les courbes intensité/durée/fréquence de la surcote : Cette méthode consiste à prendre une phase de montée linéaire, basée sur des temps de montée connus. La phase de descente est ensuite établie en calculant, pour chaque intensité de surcote, la durée de dépassement de celle-ci à partir de la courbe intensité/durée/fréquence. Par exemple, dans le cas des surcotes à Sète, la surcote synthétique mono-fréquence centennale de 70 cm sera dépassée 5h, celle de 60 cm 12h… Cette méthode n'est envisageable que pour un cycle de marée.
- la surcote (ou le marégramme) moyenne normalisée : Cette méthode consiste à normaliser les marégrammes ou surcotes extrêmes observés sur un diagramme normalisé sur une durée de référence centré sur le pic. Cette surcote (ou marégramme) moyenne permet de respecter les formes des événements passés. Dans le cas de la surcote, il est possible de réaliser une surcote moyenne mono-fréquence en établissant la phase de descente avec les courbes intensité/durée/fréquence comme indiqué dans la première méthode avec la surcote synthétique mono-fréquence.

3 Choix du niveau de référence en estuaire

Pour les secteurs estuariens et deltaïques placés sous la double-influence fluviale et maritime, une approche spécifique doit être mise en œuvre. Réceptacles multiples, les zones de lagunes se trouvent aussi dans des zones estuariennes ou deltaïques, où les concomitances avec les eaux de pluies captées localement ou les forts débits de fleuves côtiers sont parfois prédominantes. Des simulations numériques permettant de tester dif-

férentes situations, événements historiques ou centennaux, peuvent être réalisées pour déterminer le niveau de référence à la côte. Sur ces zones l'impact des vagues étant moindre que sur les sites exposés l'événement de référence peut être défini par comparaison des niveaux à la côte des différents événements testés.

En chaque point **le long de l'estuaire**, où les influences maritimes et fluviales varient, le niveau retenu est le niveau le plus haut des événements historiques ou des événements centennaux. Les niveaux retenus le long de l'estuaire composent la courbe enveloppe haute de l'ensemble des niveaux obtenus pour chaque événement testé. A l'aval, où l'influence fluviale est négligeable, le niveau retenu sera le niveau marin (*Z*) selon la méthode proposée ci-dessus intégrant la surcote liée aux vagues. A l'amont, où l'influence maritime est négligeable, le niveau retenu est celui généré par le débit (*Q*) le plus fort entre le débit historique et le débit centennal. Différents couples (*Z*, *Q*), représentant des événements historiques ou centennaux (dans ce cas Z et Q ont des périodes de retour inférieures à 100 ans), sont donc testés afin de déterminer leur impact en termes de niveaux d'eau le long de l'estuaire. Selon les situations, différents paramètres influents, déterminés à partir d'analyses de sensibilité et de l'analyse des événements historiques, sont à prendre en compte (vent, surcote, pluie…), soit directement, soit au travers d'un des deux principaux paramètres niveau marin et débit. Des « familles d'événements », liées à un même type d'événement météorologique, peuvent être déterminées à partir de l'analyse des événements historiques afin d'intégrer une dépendance partielle entre le débit et niveau marin et d'évaluer l'évolution temporelle de chaque paramètre pendant un événement type (cf. Encart 19).

Encart 19 : L'analyse des niveaux d'eau extrêmes de l'estuaire de La Gironde (CETE du Sud-Ouest)

Une étude particulière de connaissance des phénomènes fluvio-maritimes et d'actualisation des données relatives à l'estuaire de la Gironde a été engagée en 2006. Sous une co-maîtrise d'ouvrage État (DDTM de Gironde) et du SMIDDEST - Syndicat Mixte pour le Développement Durable de l'Estuaire de la Gironde (EPTB compétent), un référentiel commun de connaissances est construit et des objectifs ambitieux sont partagés et intégrés dans un futur Schéma de gestion du risque inondation. Sont abordés principalement les grands équilibres hydrauliques, l'état du système de protection (digues), les phénomènes hydro-météorologiques caractéristiques des événements extrêmes, les événements de référence d'un point de vue réglementaire mais également pour le schéma de gestion du risque inondation, une stratégie de gestion du risque inondation à l'échelle de l'estuaire afin de protéger certains territoires stratégiques, d'évaluer l'impact hydraulique de cette stratégie et de le compenser dans d'autres secteurs.

L'approche menée s'est déroulée en deux étapes :
- une analyse hydrologique poussée du fonctionnement estuarien (plus grand estuaire d'Europe, 70 km du Bec d'Ambès à la pointe de Grave),
- une modélisation de l'estuaire.

L'analyse hydrologique a pour objectif de comprendre les variations des niveaux d'eau dans l'estuaire qui sont le résultat de la combinaison de phénomènes naturels qui ne sont pas tous dépendants à l'échelle de l'estuaire. Les débits des fleuves et la genèse des grandes crues issues de deux bassins versants de plusieurs centaines de km², Dordogne et Garonne, sont rarement simultanées, et ont surtout un fonctionnement hydrologique indépendant d'une tempête dépressionnaire qui se formerait dans l'Atlantique, et qui générerait au Verdon des surcotes importantes, ou un vent fort sur le plan d'eau estuarien.

Pour choisir les événements à tester, l'analyse hydrologique s'est basée, d'une part, sur une analyse historique fine de 17 événements fluviaux-maritimes (intensités, paramètres d'influence…) et d'autre part, sur une analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes.

L'analyse statistique de détermination des niveaux d'eau extrêmes est menée sur l'ensemble des 9 marégraphes du Grand Port Maritime de Bordeaux (GPMB) sur l'estuaire (du marégraphe du Verdon à celui de Bordeaux sur la Garonne et à celui d'Ambès sur la Dordogne) à partir de 85 années de données, les plus anciennes remontant au début du XXème siècle (cf. Illustration 41). Les niveaux d'eau centennaux ont été estimés

sur l'ensemble des marégraphes. Cette analyse statistique vise à définir des périodes de retour caractéristiques aux différents marégraphes, qui seront par la suite la base des choix pour les événements réglementaires.

Niveaux d'eau extrêmes aux marégraphes du GPMB (loi de Gumbel)
(m NGF IGN 69)

Période de retour	Bordeaux	Le Marquis	Fort Médoc	Pauillac	Laména	Pointe Richard	Le Verdon
2	4,65	4,31	4,05	3,85	3,63	3,34	3,23
5	4,77	4,45	4,18	3,96	3,79	3,45	3,34
10	4,84	4,53	4,26	4,03	3,89	3,52	3,41
50	5	4,71	4,44	4,2	4,09	3,68	3,57
100	5,06	4,79	4,52	4,27	4,17	3,75	3,64
200	5,12	4,86	4,59	4,34	4,25	3,82	3,71
500	5,21	4,96	4,7	4,43	4,36	3,91	3,8
1000	5,27	5,04	4,77	4,5	4,45	3,98	3,87

Illustration 41 : Tableau de synthèse de l'analyse statistique des quantiles de niveaux d'eau associés à une période de retour

L'analyse des 17 événements historiques a permis de hiérarchiser l'influence des différents paramètres suivants en caractérisant leur intensité respective : surcote au Verdon, vent sur l'estuaire, coefficient de marée et débits fluviaux. Cette analyse est comparée aux conséquences de ces 17 événements que sont les niveaux d'eau enregistrés sur les marégraphes le long de l'estuaire. Ainsi, certains des 17 événements analysés ont pour origine plutôt une forte marée associée à un vent moyen et des débits faibles les définissant à caractéristique « maritime », d'autres à des vents forts associés à une forte surcote mais généralement une marée moyenne (Klaus en 1999) les définissant à caractéristique de « tempête ». L'événement du 28 février 2010 (Xynthia) n'a pas été utilisé pour cette analyse ; il pourrait se caractériser par un vent moyen, une marée forte et surcote concomitante à la marée de pleine mer, le classant en tant qu'événement « maritime ».

Ainsi, quatre catégories d'événements se distinguent :
- Tempête : vents forts (> 100 km/h), marées moyennes (coef. 75 et 99), débits faibles ;
- Maritime : vents moyens (> 50 km/h), marées importantes (coef. >100), débits faibles ;
- Fluvial : vents faibles, marées moyennes, débits forts (> Tr=10 ans) ;
- Fluvio-maritime : vents faibles, marées fortes, débits forts.

La deuxième étape consiste au choix des événements de référence par comparaison des différents événements identifiés lors de l'analyse hydrologique (17 événements) et des choix sur l'intensité des différents paramètres influençant les conditions limites (surcote, coefficient de marée, vent sur l'estuaire, débits fluviaux, rupture de digue, plusieurs marées débordantes). Pour cela, un modèle complet de l'estuaire, développé sous Telemac 2D (taille des mailles de 500 m en moyenne), permet de représenter le fonctionnement hydrodynamique de l'estuaire.

Le choix des événements de référence s'est porté sur les événements générant les niveaux d'eau les plus hauts en chaque point de l'estuaire (cf. Illustration 42), à la condition d'être caractérisés par des niveaux d'eau de période de retour au moins centennale.

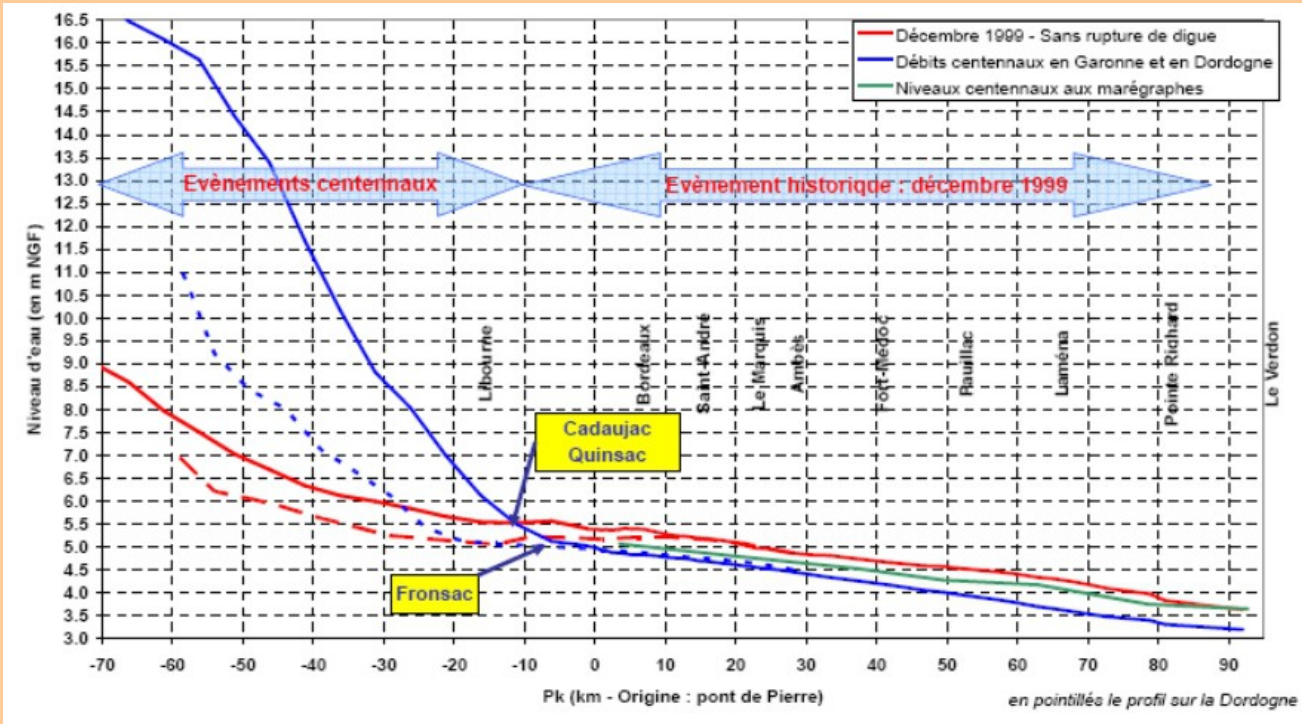


Illustration 42 : Synthèse des événements de référence retenus le long de l'estuaire

Ainsi les choix se sont portés :
- sur un évènement historique ayant généré les plus hauts niveaux observés sur l'estuaire, à savoir la tempête de décembre 1999 pour la partie aval,
- sur des événements de débits centennaux sur les parties sous influence fluviale (Garonne à l'amont de Cadaujac et Quinsac et Dordogne à l'amont de Fronsac).

Les caractéristiques de ces événements sont précisés en Illustration 43.

Événements retenus	Nom événement et/ou date	Coefficient de marée maximum	Surcote Verdon (m)	Débit max. Garonne (m^3/s)	Débit max. Dordogne (m^3/s)	Débit max. Isle (m^3/s)	Vent max. (km/h)	Vent (type et direction)	Type
Niveaux les plus hauts sur l'estuaire aval	27/12/99 (événement réel sans rupture de digues)	77	1,55	700	550	100	194	Tempête - Ouest	Tempête
Niveaux les plus hauts sur Garonne amont	Événement centennal Garonne (théorique)	114		7700	2000	75	nul		Fluvial
Niveaux les plus hauts sur Dordogne amont	Événement centennal Dordogne (théorique)	114		4800	4000	400	nul		Fluvial

Illustration 43 : Tableau de synthèse des caractéristiques des événements de référence retenus sur l'estuaire

4 Définition des caractéristiques de l'événement de référence en dehors de débordement significatifs

Les événements marins naturels sont caractérisés par deux paramètres, le niveau d'eau et la hauteur significative des vagues. Ces paramètres sont définis au large mais leur caractérisation à la côte est nécessaire pour choisir l'événement de référence puisque l'événement retenu est le plus pénalisant en termes de submersion, ce qui revient à dire le plus pénalisant en termes de volumes entrants. Les volumes d'eau entrants sont liés aux trois modes de submersion : le débordement, le franchissement par paquets de mer et la rupture, pouvant être considérée comme un débordement particulier pour lequel la cote du seuil varie dans le temps.

Le volume d'eau entrant total est la somme des volumes entrants par débordement *d,* liés au niveau marin total, et des volumes entrants par franchissements par paquets de mer *f* : $V = V(d) + V(f)$

L'événement naturel de référence est celui générant les volumes d'eau entrants les plus importants parmi les événements centennaux (plusieurs événements centennaux pouvant être étudiés du fait de la description de l'événement par un couple de 2 paramètres) et historiques.

La démarche mise en œuvre pour définir l'événement de référence dépend de la possibilité de survenue de débordements et de franchissements (cf. Illustration 44) :

- lorsqu'il n'y a pas de franchissements ou que ceux-ci sont négligeables, l'événement de référence retenu est, parmi les événements centennaux ou historiques, celui générant les volumes entrants par débordement les plus importants, c'est-à-dire l'événement générant le niveau marin le plus important (cf. 2.4.3.c - 1).
- lorsque le débordement est significatif par rapport aux franchissements, l'événement de référence retenu peut être celui générant le niveau marin le plus haut. Les franchissements sont alors ceux associés au couple niveau d'eau/ vagues retenu cf. 2.4.3.c - 1).
- lorsque les débordements sont négligeables, l'événement de référence retenu est, parmi les événements centennaux ou historiques, celui générant les volumes entrants par franchissement les plus importants (cf. 2.4.3.c - 7). Des estimations et comparaisons des volumes de franchissement des événements centennaux et historiques sont donc nécessaires pour définir l'événement de référence.
- Dans les cas où les débordements et les franchissements sont significatifs, le choix de l'événement de référence peut se faire après test et comparaison de la résultante de chacun des couples niveau d'eau/vagues en termes de volumes d'eau entrants (l'événement générant les débordements les plus importants n'étant pas nécessairement le même que celui générant les franchissements par paquets de mer les plus importants). Dans ce cas particulier, le calcul des volumes entrants nécessite de formuler dès à présent des hypothèses sur la défaillance des structures de protection et de procéder éventuellement de manière itérative puisque ces hypothèses dépendent aussi du niveau marin à la côte.

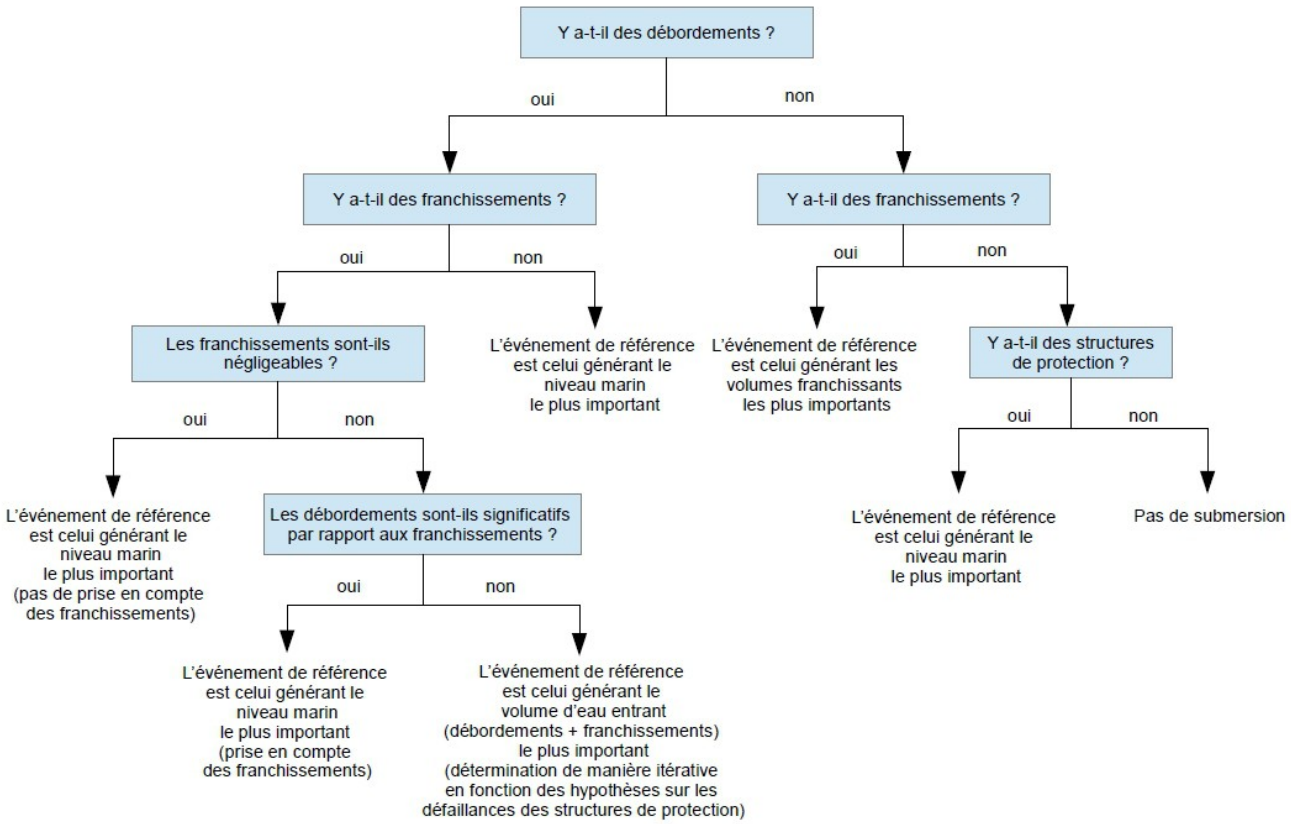


Illustration 44 : Démarche du choix de l'événement naturel de référence

5 *Evolution de l'événement de référence le long du littoral*

A l'échelle du bassin d'étude, la détermination de l'aléa de référence peut reposer sur le choix de plusieurs événements naturels, pouvant être différents. Si sur un linéaire considéré comme homogène par ses caractéristiques (exposition aux vagues, cote du terrain naturel ou des structures de protection…), un seul événement naturel de référence est à retenir, à l'échelle d'un bassin d'étude des aléas plus complexe, plusieurs types d'événements de référence doivent être analysés (cf Encart 17). Sur certains secteurs, à plusieurs points d'entrée d'eau, plusieurs événements naturels différents (représentés par plusieurs couples de paramètres) peuvent être retenus du fait de l'évolution de leurs caractéristiques le long du littoral (cf. estuaires) et/ou du fait de l'évolution de la côte. L'aléa de référence est alors l'enveloppe des aléas associés aux événements naturels retenus et résulte de la prise en compte en tout point du territoire de l'aléa le plus pénalisant (hauteur ou couple hauteur/dynamique de submersion).

Encart 20 : Exemple de site à configuration complexe nécessitant une analyse approfondie des événements naturels : la Pointe de Fouras

La commune de Fouras a la forme d'un cap qui, au nord de l'embouchure de la Charente, s'avance dans le pertuis d'Antioche (cf. Illustration 38) en direction de l'Île d'Aix. L'extrémité de ce cap forme la Pointe de la Fumée, orientée du sud-est au nord-ouest. La topographie de la Pointe de la Fumée a presque partout une altitude supérieure à 3,50 m NGF, qui reste cependant inférieure aux niveaux marins lors de très fortes tempêtes. La configuration de la pointe la rend ainsi très vulnérable aux phénomènes de choc des vagues et de submersion (CGEDD, 2011).

Illustration 45 : Situation géographique de la commune de Fouras, au fond du Pertuis d'Antioche (Données : PlanetObserver, Source : Géoportail)

L'analyse de ce site doit débuter par la caractérisation des conditions hydrauliques sur chaque face de la pointe où, sur chacune d'elles, des entrées d'eau peuvent être observées. Il apparaît que ce site est exposé :
- à la houle qui se propage par le pertuis d'Antioche. Elle est atténuée par l'obstacle constitué par l'île d'Aix et par les platiers rocheux,
- aux clapots qui se forment sur des fetchs d'environ 10 km soit au nord soit au sud-ouest.
Au cours d'un même événement, le site peut ainsi être exposé à la combinaison de la houle et d'un clapot dont les caractéristiques dépendent, pour la houle, des conditions de vent au large au moment de sa formation, et, pour le clapot, des conditions de vent dans le pertuis au cours de l'événement. Il en résulte que les conditions maritimes peuvent être très variables selon le linéaire exposé.

Par ailleurs, l'état de mer exerce une influence sur les niveaux marins observés localement du fait de la surcote engendrée par le déferlement des vagues. Pendant Xynthia, une différence d'environ 40 cm a été constatée sur la pointe entre les niveaux atteints sur les zones exposées aux vagues (surcote liée aux vagues) et sur les zones non exposées (SOGREAH, 2010).

En conclusion, il ressort que les conditions maritimes les plus défavorables ne sont pas issues d'un unique événement sur des sites présentant plusieurs expositions à la houle et aux clapots. Une analyse des conditions susceptibles d'intervenir sur chaque face de la pointe doit ici être menée indépendamment pour définir le (ou les) événement(s) le(s) plus impactant(s).

6 Estimation des volumes débordants

Pour estimer les volumes entrant par débordement ou par rupture des structures de protection (On considère les intrusions d'eau marines consécutives à une rupture comme un débordement au-dessus d'une cote, qui peut varier dans le temps), les paramètres nécessaires sont :

- le niveau marin de référence,
- l'évolution de ce niveau dans le temps, c'est-à-dire le marégramme,
- les cotes du terrain naturel ou des structures de protection,
- l'évolution de ces cotes de seuil dans le temps.

Les volumes débordants peuvent alors être estimés, par exemple, par des lois de seuils (cf. Encart 13) ou des lois de Strickler, plus la rugosité étant importante plus les volumes entrants étant limités. En cas de rupture, des

hypothèses doivent être émises sur les dimensions de la brèche qui influent directement sur les volumes entrants.

Encart 21 : Loi de seuil (CETE Méditerranée)

Les lois de seuil permettent d'estimer les volumes d'eau débordant au dessus d'une cote. Ces formules simples peuvent être utiles pour valider le choix de la méthode de cartographie ou permettre leur mise en œuvre (cf. 2.4.4). En particulier pour savoir s'il est nécessaire de réaliser des modélisations hydrauliques poussées, il peut être intéressant de calculer le volume maximal qui peut pénétrer dans des zones basses avec une loi de seuil simple maximaliste.

Pour cela, la formule de seuil rectangulaire épais dénoyé suivante peut être utilisée pour calculer le débit (m^3/s) :

$$Q = C_d L \sqrt{2g} H^{3/2}$$

Avec C_d coefficient du débit du seuil variant entre 0,32 et 0,5 selon que le seuil est bien ou mal profilé et pouvant être pris à 0,4 en première approche,
L le linéaire (m) concerné par l'écoulement ou largeur du seuil,
H la hauteur (m) comprise entre le niveau d'eau et le seuil.

La connaissance de l'évolution du niveau marin de référence dans le temps permet d'estimer les volumes totaux entrants par débordement.

Par exemple, dans le cas d'un littoral avec un niveau marin de référence à 2,5 m NGF environ, avec des hauts de plage se situant aux environs de 1,5 m NGF, le débit est estimé à près de 2 $m^3/s/ml$ de littoral à pleine mer. A partir de la connaissance de l'évolution du niveau marin lors du cycle de marée (cf. Illustration 46), un volume débordant de 16700 m^3/ml de littoral pour un cycle de marée peut ainsi être estimé.

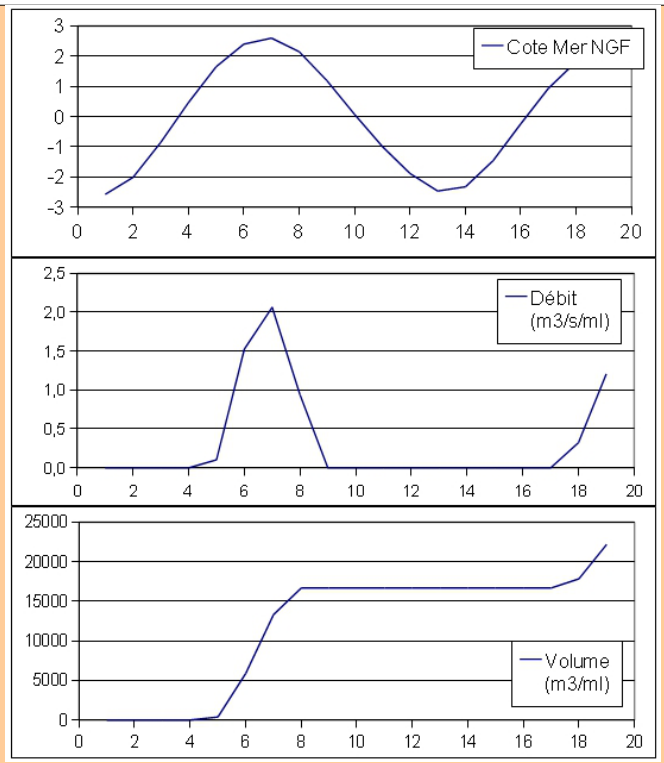


Illustration 46 : Évolution du débit (m^3/s) et des volumes entrants (m^3/ml) en fonction des variations du niveau marin au cours du temps, calculés avec une loi de seuil

Pour estimer dans quelle mesure la méthode de superposition du niveau marin de référence à la topographie est adaptée (cf. 2.4.4), il faut ensuite comparer ce volume à la capacité des zones basses à l'arrière. Dans le cas d'une zone étendue, par exemple 10 km vers les terres, de cote moyenne de 0 m NGF (cas d'anciens polders par exemple), la zone basse se serait remplie en moyenne de 1,67 m, valeur bien inférieure au 2,5 m NGF. Un simple croisement entre la topographie et le niveau marin, sans apports terrestres, fluviaux par exemple, aura tendance à surestimer les zones concernées par l'aléa.

Des études de sensibilité peuvent être menées sur deux paramètres influençant fortement les résultats :
- le linéaire de structures de protection effacé (hypothèses moins maximalistes) ;
- le haut de plage ou cote de crête des structures de protection, les formules étant très sensibles aux valeurs.

7 Estimation des volumes franchissant par paquets de mer

L'analyse du site, de son fonctionnement et des événements historiques permet de définir si une évaluation fine des franchissements est nécessaire. Les franchissements par paquets de mer peuvent conduire à des volumes d'eau significatifs, qu'il convient d'estimer, qu'ils soient l'unique mode de submersion ou simultanés à un débordement ou une rupture. Dans les cas où des débordements importants ou des ruptures peuvent intervenir, les volumes apportés par franchissement par paquets de mer peuvent être négligeables. Une analyse de leur impact par un calage sur un événement historique peut permettre de trancher si leur estimation est nécessaire.
Pour l'Outre-mer, dans un contexte de climat cyclonique, les franchissements sont systématiquement étudiés.

Encart 22 : Revue des méthodes d'estimations des franchissements (ARTELIA)

Les franchissements sont largement dépendants, d'une part, du type de côte étudié, et plus précisément du profil des fonds de l'avant-plage et du type de trait de côte et, d'autre part, de la cambrure des vagues incidentes, ces deux caractéristiques étant souvent variables dans le temps. Il est donc recommandé de rechercher au préalable les configurations et conditions les plus défavorables avant d'appliquer les méthodes décrites ci-après.

Cas des ouvrages

Les volumes franchissant les ouvrages côtiers ont fait l'objet de nombreuses campagnes d'essais en laboratoire et en nature en 2D et en 3D débouchant sur une méthodologie européenne d'estimation par calcul (Pullen *et al*., 2007). Cette approche propose deux méthodes : d'une part, des formules empiriques et, d'autre part, un logiciel de calcul plus précis utilisant la technique des réseaux neuronaux. Ce type d'approche nécessite de connaître les conditions de houle au pied de l'ouvrage et non pas au large. Un point important dans l'application de cette approche est l'estimation du coefficient de rugosité associé à l'ouvrage franchi. Une estimation plus précise des volumes franchissants, mais plus difficile d'emploi au regard des deux méthodes précédentes, est également possible en utilisant une modélisation numérique hydrodynamique comme celle proposée par Losada *et al.* (2008). Ce code de calcul résout les équations de Navier-Stokes moyennées et prend en compte les écoulements poreux non-linéaires à travers les carapaces et les sous-couches des ouvrages. Il permet de répondre à l'ensemble des besoins en fournissant la surcote et les volumes franchissants.

Cas des plages

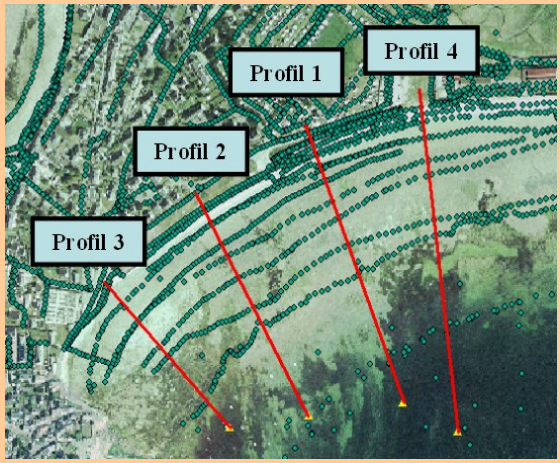
Laudier *et al.* (2011) rapportent une application des formules empiriques de l'Eurotop (Pullen *et al.*, 2007) au calcul des débits franchissants mesurés sur une plage en nature. Un bon accord est trouvé pour un coefficient de rugosité autour de 0,65. Deux autres formules sont également comparées dont celle de Hedges et Reis (1998) mise à jour par Reis *et al.* (2008), qui présente l'avantage de calculer un volume franchissant nul lorsque l'affleurement maximal est inférieur à la cote de la crête de l'ouvrage ce qui n'est pas le cas des formules de l'Eurotop.

Des estimations plus ou moins fines sont possibles suivant la complexité des secteurs (cf. Encarts 22, 23 et 24). Plusieurs ouvrages font des synthèses des méthodes existantes (CIRIA, CUR, CETMEF, 2009 ; Pullen *et al.*, 2007 ; TAW, 2001). Les modèles numériques et formules empiriques peuvent en effet faire intervenir un nombre variable de paramètres. Les formules empiriques employées doivent faire l'objet d'une attention particulière afin de vérifier leur domaine de validité, en particulier en ce qui concerne le profil d'avant-côte, de l'estran, de l'éventuelle partie émergée de la plage et des ouvrages. La qualité des données, et en particulier des données bathymétriques et de vagues, et la qualité du calage contribuent à la précision des résultats.

Encart 23 : Calcul des débits de franchissement à Gâvres – PPRL Gâvres (DHI)

Les débits franchissants les ouvrages de protection ont été estimés en tenant compte des conditions de vagues et du niveau de la mer au droit de ces ouvrages (Peeters et al., 2009). Pour cela, ces conditions ont été estimées en simulant la propagation des vagues le long de profils de plage, perpendiculaires au trait de côte et s'étendant jusqu'aux ouvrages en question. Cette simulation a permis de caractériser la hauteur des vagues en tenant compte de sa déformation (shoaling, déferlement, réfraction, frottement sur le fond), ainsi que du niveau de la mer.

Le débit linéique de franchissement a ensuite été calculé à l'aide des formules empiriques du TAW (2001). Ce débit linéique est finalement intégré sur le linéaire de l'ouvrage représentant chaque profil, pour obtenir le débit total de franchissement. Pour prendre en compte la variabilité des ouvrages du front de mer, le linéaire côtier a été divisé en quatre secteurs, chacun représenté par un profil distinct (cf. Illustration 47).



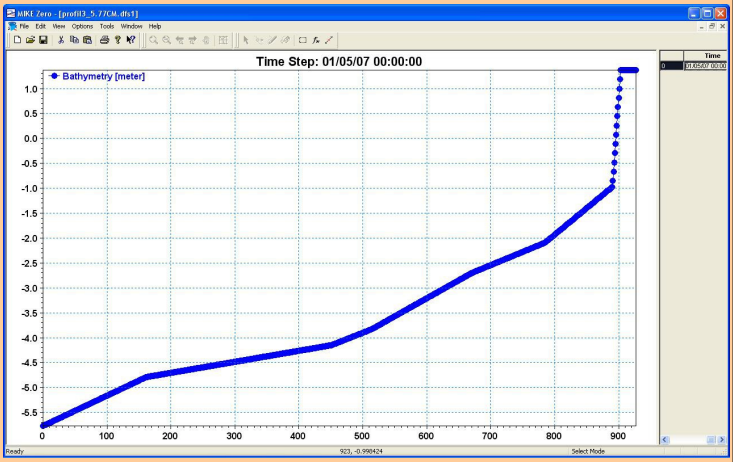


Illustration 47 : Localisation de profils à Gâvres (à gauche) et exemple de profil de plage (à droite)

Ces calculs ont été effectués pour chaque heure de la marée, afin de reproduire l'évolution temporelle du niveau de la mer et des conditions de vagues associées (cf. Illustration 48).

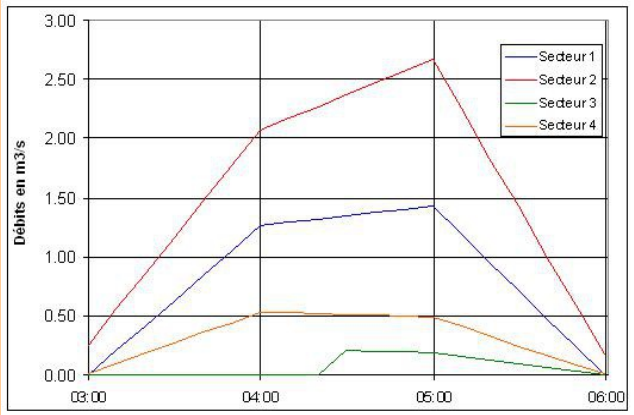


Illustration 48 : Débits franchissants caractéristiques de chaque secteur pour l'événement du 10 janvier 2001

Encart 24 : Estimation des franchissements sur la plage du Tréport (CETE Normandie-Centre)

L'estimation de l'aléa submersion marine du PPR de Mers-les-Bains/Eu/Le Tréport repose sur une exploitation de l'ensemble des données locales disponibles. L'analyse du fonctionnement hydraulique du site a conduit à identifier deux zones de submersion marine sur le secteur : le port, d'une part, soumis à des débordements et la plage d'autre part, soumise à des franchissements. Des réflexions importantes ont été menées sur l'estimation des volumes franchissants, prédominants sur le secteur à l'arrière de la plage. Cette estimation a été réalisée en deux étapes : une estimation des houles à la côte puis, une estimation des débits et volumes franchissants.

L'événement de référence est un événement centennal. Les niveaux marins ont été repris des données SHOM/CETMEF et une analyse statistique des houles sur la base de deux points ANEMOC a été effectuée par le CETE Méditerranée. La méthode simplifiée du DEFRA a été utilisée pour la définition du couple niveau marin/hauteur de vagues, avec un coefficient de faible corrélation. Par la suite, ces conditions de houles ont été propagées à la côte sur la base de deux modèles emboîtés. Le premier utilise comme conditions aux limites une interpolation linéaire entre les deux points ANEMOC. Le second modèle, qui prend en compte les variations du niveau marin, commence pour des fonds de l'ordre de -15 à -20 m NGF et prend en condition d'entrée les résultats du modèle grande emprise.

L'estimation des franchissements a ensuite pu être effectuée. Ceux-ci ont dû être estimés sur trois familles de profils distincts correspondant à trois types d'ouvrage : un perré parabolique en maçonnerie, en place en 1990 lors de l'événement de calage de la méthode, un perré en enrochements, en place depuis une dizaine d'années au lieu du perré, et un cordon de galet adossé au perré sur la partie aval de la plage (cf. Illustration 49).

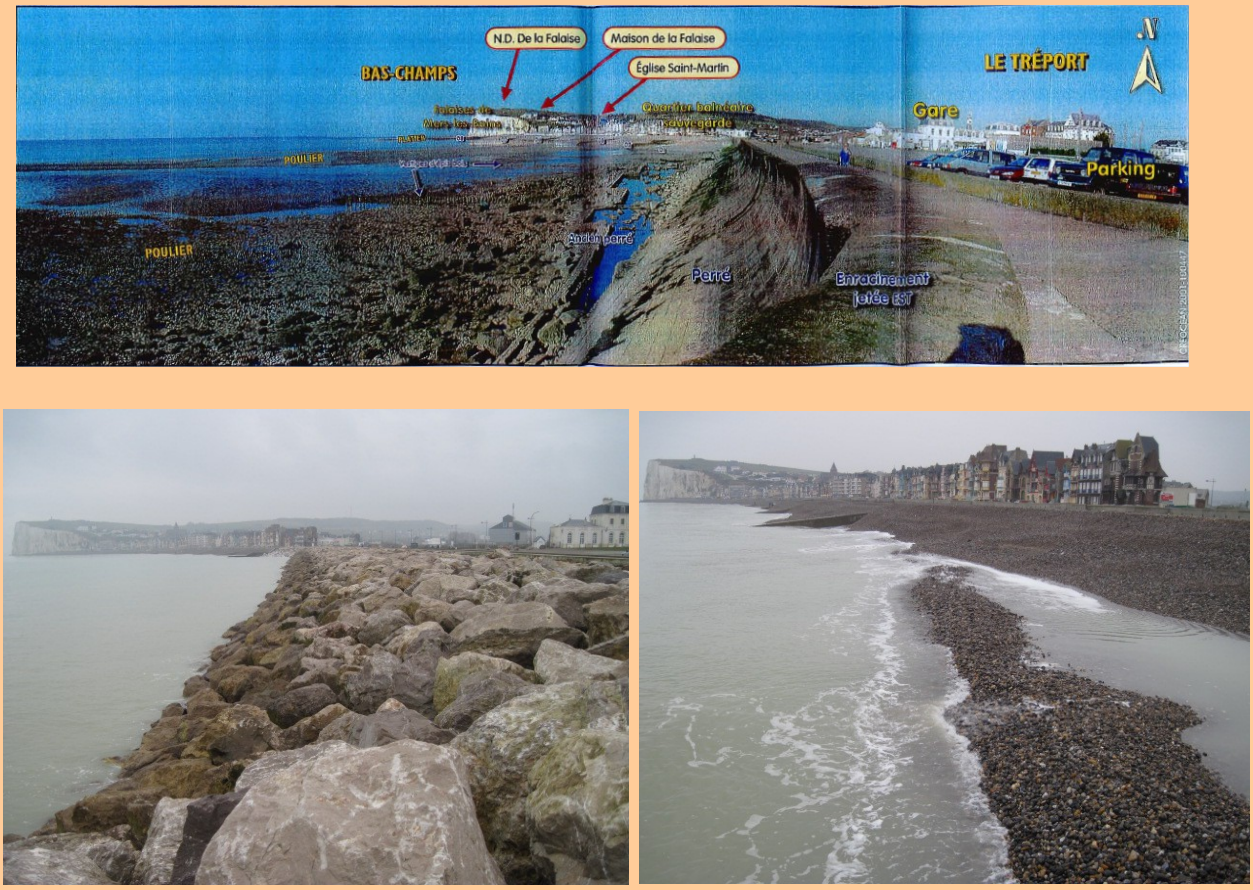


Illustration 49 : Familles d'ouvrages concernées par le calcul des franchissements a) Perré maçonné (1990) b) Perré en enrochements c) Cordon de galets

Les calculs de franchissements s'appuient sur les recommandations de l'EurOtop (Pullen *et al.*, 2007) et reposent sur l'utilisation de la formule suivante pour une digue :

$$\frac{q}{\sqrt{gHm0^3}} = a\exp\left(-b\frac{Rc}{Hm0}\right)$$

q le débit linéique de franchissement (m^3/ml/s)
Hm0 la hauteur significative de houle (m)
$Rc=z_{crête}-z_{eau}$ le franc-bord (m)
a, b des coefficients **complexes** à ajuster en fonction des caractéristiques de l'ouvrage et du type de déferlement

Néanmoins, les ajustements et outils proposés par ce document ne s'appliquent pas directement aux ouvrages en place (ouvrages complexes, crêtes larges, conditions hydrodynamiques fortes, etc.). Ainsi, disposant des résultats du modèle physique construit par le LNHE en 1996 pour le dimensionnement du perré en enrochements, les formules de franchissements ont été adaptées en ajustant les coefficients *a* et *b* sur les différents profils des ouvrages à partir des résultats de franchissements calculés dans le modèle physique. Cette méthode présente l'avantage de s'appuyer sur des données locales et de mettre en exergue l'efficacité du perré en enrochements. Elle présente cependant l'inconvénient de ne pas pouvoir évaluer l'influence de certaines caractéristiques, telles que le niveau de remplissage des casiers en galets ou encore la destruction de la crête du perré, car les caractéristiques de l'ouvrage sont telles que testées dans le modèle physique.

L'événement de février 1990 ainsi que les événements centennaux ont ainsi pu être reconstitués, l'événement de 1990 permettant de valider la méthode. Les évolutions de houle (ANEMOC) et de niveau marin (port de Dieppe) ont été calculées sur les deux heures qui ont précédé le pic de marée et sur les deux heures qui ont suivi par pas de 5 min, ce qui a permis d'estimer les hydrogrammes franchissants, puis par intégration en temps et sur le linéaire, les différents volumes franchis.

2.4.3.d - Prise en compte des structures jouant un rôle de protection et de leurs défaillances

1 Les ouvrages de protection

Principes

Les ouvrages de protection ont vocation à protéger les populations existantes. Ils permettent notamment, sous réserve qu'ils soient conçus dans les règles de l'art et correctement entretenus, de jouer un rôle pour les personnes habitant dans la zone protégée aussi bien pour des événements fréquents, de type événements annuels (absence de submersion), que pour des événements plus rares, d'occurrence centennale ou moindre par exemple (réduction des franchissements par paquets de mer et des surverses qui en résultent sur le littoral). Ces ouvrages de protection réduisent la fréquence de perception des phénomènes dommageables auxquels les personnes sont soumises et ainsi les dommages en résultant. **Néanmoins, il ne faut pas oublier qu'ils induisent un aléa supplémentaire en cas de rupture**. Enfin, un risque important subsiste pour les événements d'intensité supérieure à l'événement dimensionnant l'ouvrage.

Ainsi, le PPRL doit prendre en compte l'ouvrage :

- en tant qu'objet de danger potentiel : aucun ouvrage ne pouvant être considéré comme infaillible, le PPRL doit prendre en compte la possibilité de rupture (localisée ou générale). Il se traduit par des vitesses et des phénomènes d'érosion importants derrière l'ouvrage,
- en tant qu'objet de protection : en prenant en compte le rôle de limitation des volumes d'eau entrant dans les cas où le dimensionnement et la qualité de l'ouvrage lui permettent de limiter effectivement l'inondation du territoire considéré.

L'élaboration du projet de PPRL repose sur le principe fort qu'une zone protégée par une digue reste une zone inondable. Il s'agit d'une politique cohérente et constante de l'État, datant de la « loi de 1858 relative à l'exécution des travaux destinés à mettre les villes à l'abri des inondations » et qui a été rappelée à plusieurs reprises par l'intermédiaire de circulaires diffusées entre 1994 et 2004. La circulaire du 30 avril 2002, relative à la politique de l'État en matière de risques naturels prévisibles et de gestion des espaces situés derrière les digues de protection contre les inondations et les submersions marines, précise ce cadre dont les principes sont toujours d'actualité.

Aucun ouvrage ne peut être considéré comme infaillible, quelles que soient ses caractéristiques et sa résistance présumée. En conséquence, le caractère inondable d'une zone endiguée doit être clairement rappelé à l'occasion de l'élaboration du PPR à des fins pédagogiques. Sauf impossibilité structurelle, le PPRL affiche ainsi la cartographie de la zone de submersion en l'absence d'ouvrages. Cette carte, annexée au PPRL, dont le rôle est uniquement pédagogique, permet de rappeler l'histoire du territoire, notamment son exposition « naturelle » aux inondations en l'absence d'ouvrages (selon la définition précisée ci-dessous), et d'informer sur les hypothèses prises sur le comportement des ouvrages de protection pour caractériser l'aléa de référence.

La présence d'ouvrages de protection impacte l'élaboration du PPRL à plusieurs étapes :
- celle de l'établissement de l'aléa de référence,
- celle de l'établissement du zonage et du règlement.

Ouvrages considérés

Un système complet de protection est un système cohérent du point de vue hydraulique pour la protection effective des populations situées dans la zone protégée. Il peut comprendre un système de digues (c'est-à-dire des digues de premier et de second rang), des structures naturelles (cordons dunaires ou cordons de galets) et les ouvrages « maritimes » contribuant à leur maintien (type brise-lames, épis, etc.), éventuellement combinés, ainsi que les dispositifs de drainage, de stockage et d'évacuation des eaux.

Les **« digues »** sont des constructions humaines dont la vocation principale est de faire obstacle à l'écoulement et de limiter les entrées d'eau sur la zone protégée. Les digues sont les seuls ouvrages considérés dans ce paragraphe et décrits sous la dénomination « ouvrages ».

Critère de choix du mode de défaillance des ouvrages pour la caractérisation de l'aléa de référence

Aucun ouvrage ne pouvant être considéré comme infaillible, il est important de déterminer le comportement des différents ouvrages constituants le système de protection afin d'appréhender de manière dynamique la survenue de l'événement, d'autant que ceux-ci vont jouer un rôle dans le volume entrant sur le territoire étudié. C'est pourquoi la première étape de la prise en compte des ouvrages dans le projet de PPRL proprement dit consiste à déterminer leur comportement face à l'événement de référence. Cette analyse est basée sur les caractéristiques actuelles des ouvrages et des défaillances constatées lors d'événements historiques.

Pour l'élaboration de la carte d'aléa, pour chaque tronçon d'ouvrage, une hypothèse de défaillance doit être définie. Le tronçon est un segment homogène d'un ouvrage en termes de nature et de caractéristiques géométriques. Le choix entre les deux modes de défaillance suivants doit être réalisé (cf. Illustration 50) :

- ruine généralisée (effacement complet),
- défaillances ponctuelles (brèches).

Le choix du scénario de défaillance s'appliquant à chaque tronçon doit provenir des éléments techniques fournis par le gestionnaire (notamment issus des études de danger). Le scenario de défaillance comporte deux types d'analyse : une analyse fonctionnelle externe (fonction hydraulique de l'ouvrage dans le système de défense contre les inondations) et une analyse fonctionnelle interne ou analyse structurelle (comportement de la structure). Selon les éléments techniques disponibles apportés par le gestionnaire de l'ouvrage, on retiendra une hypothèse de ruine ou de brèches du système de protection

Dans le cas où ces éléments ne sont pas disponibles lors de l'élaboration du PPRL, le choix des situations de défaillance hydraulique du système de protection repose sur une analyse fonctionnelle simplifiée, basée sur des hypothèses et des choix fondés sur l'impératif de protection des vies humaines et des biens face au risque de submersion marine. Cette analyse s'appuie alors sur les critères suivants :

- **le caractère submersible du tronçon et sa capacité à résister à la surverse** qui s'apprécie en fonction de son profil en long (cote de crête de l'ouvrage) et du niveau marin de référence. On considère que, à partir d'une surverse de plus de 20 cm, l'ouvrage est soumis à une ruine généralisée. En dessous de 20 cm de surverse, il convient d'apprécier le comportement du système de protection, la ruine apparaissant dans la majorité des cas avec quelques centimètres de surverse, sauf si l'ouvrage est spécialement conçu pour être surversé. Dans ce dernier cas, on peut considérer des hypothèses de brèche.

- **le caractère franchissable par paquets de mer du tronçon et sa capacité à résister aux franchissements** qui s'apprécie en fonction du profil en long (cote de crête de l'ouvrage), des profils bathymétriques et des estimations des débits franchissants et des run-up. Cette analyse permet de traduire l'exposition du tronçon aux vagues. On considère que si les débits franchissants sont significatifs, une défaillance généralisée peut être retenue.
- **la constatation de détériorations majeures de l'ouvrage ou d'une conception manifestement insuffisante pour résister à l'événement de référence**, basée sur un diagnostic visuel simple, peut conduire à retenir une ruine généralisée.

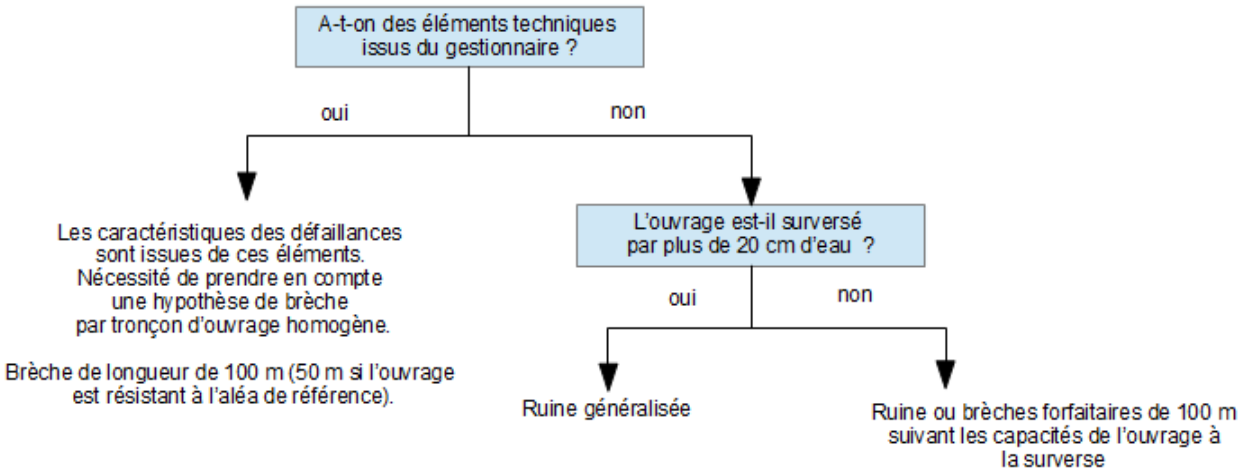


Illustration 50 : Démarche simplifiée de prise en compte des ouvrages

Les hypothèses de défaillance retenues pour l'élaboration de la carte d'aléa à échéance 100 ans repose sur l'événement de référence à échéance 100 ans.

Ruine généralisée

La ruine généralisée est une hypothèse sécuritaire correspondant à un effacement complet de l'ouvrage, afin de ne pas sous-estimer les volumes entrants. Dans le cas où elle est retenue, les ouvrages sont effacés, c'est-à-dire considérés comme transparents. Les ouvrages sont arasés au niveau du terrain naturel, c'est-à-dire que la ligne de crête est ramenée à la position de la topographie du site en l'absence d'ouvrage.

Les zones soumises à de très forts écoulements après la ruine, situées en arrière de l'ouvrage, sont identifiées dans la bande de précaution liée aux ouvrages de protection (cf. 3.3.3.c.4 bandes de protection relatives aux ouvrages de protection).

Brèches

Une brèche peut être définie comme une ouverture dans un système d'endiguement, consécutive à une perte de matériaux, pouvant générer des venues d'eau substantielles et incontrôlées qui conduisent à l'inondation de terrains situés en arrière.

Le choix des hypothèses de brèche repose sur les critères suivants :

- la largeur des brèches est par défaut de 100 m, sauf si l'analyse historique fait état de brèches plus larges par le passé ;
- dans le cas d'un ouvrage dit « résistant à l'aléa de référence » (cf. chapitre 6.2.2 de la circulaire du 27 juillet 2011 repris ci-dessous) et à condition que le gestionnaire fournisse les études techniques nécessaires, la largeur de brèche peut être inférieure à 100 m, sans toutefois être inférieure à 50 m ;

- une brèche minimum doit être retenue par tronçon d'ouvrage et/ou par casier hydraulique,
- la cote au lieu de la brèche est celle du terrain naturel à l'arrière de l'ouvrage.

Pour que l'ouvrage puisse être considéré comme résistant à l'événement de référence, les conditions suivantes doivent être réunies au moment de l'approbation du PPRL :

- **l'ensemble du système de protection de la zone considérée doit être en conformité avec la réglementation relative à la sécurité des ouvrages hydrauliques**. En particulier, le responsable de l'ouvrage doit être clairement identifié,
- **le responsable de l'ouvrage doit apporter la garantie que celui-ci est dimensionné pour contenir et résister à l'aléa de référence. Un ouvrage contient l'aléa de référence lorsque la côte d'arase de celui-ci est au moins égal à la côte de l'aléa de référence. Un ouvrage est dit résistant à l'aléa de référence lorsque celui-ci ne connaît aucun désordre sur un cycle de 2 à 3 marées, suivant les conditions de la tempête de référence retenue.** Le responsable de l'ouvrage doit alors déposer un dossier engageant sa responsabilité, mentionnant la zone protégée et son niveau de protection (au moins égal au niveau correspondant à l'événement de référence du PPR) et comportant son engagement à maintenir sur le long terme ces ouvrages en conformité avec la réglementation relative au contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques et l'objectif de protection susmentionné. Le cas échéant, il peut être prévu (par convention) que la collectivité concernée se substitue au gestionnaire en cas de défaillance de celui-ci, en application de l'article L.211-7 du code de l'environnement (5è alinéa). Elle sera dans ce cas soumise aux obligations relatives à la sécurité des ouvrages hydrauliques,
- **le responsable doit être pérenne à l'échelle des politiques d'urbanisme** [7] (par exemple : structure publique),
- **la commune doit être dotée d'un plan communal de sauvegarde** détaillant les mesures d'alerte et de mise en sécurité des personnes en cas de rupture ou de surverse de l'ouvrage, ou un projet détaillé dont l'adoption est imminente et qui a déjà été présenté au préfet,
- **l'absence d'aggravation du risque sur l'existant** (dans et en dehors de la zone protégée) due à la poursuite de l'urbanisation dans la zone considérée doit être démontrée par le responsable de l'ouvrage (conformément à la réglementation relative à la sécurité des ouvrages hydrauliques),
- **l'ouvrage de protection doit disposer d'un dispositif de ressuyage des eaux** (issues des pa quets de mer, des surverses locales et/ou du ruissellement urbain).

L'ensemble des hypothèses (dimensions et forme de la brèche, lieu, temps de formation, moment de rupture, etc.) doit provenir des éléments techniques fournis par le gestionnaire et peuvent résulter de la réalisation des études de danger. Dans le cas où ces éléments ne sont pas disponibles, le choix des hypothèses repose sur l'analyse des événements historiques, l'évolution historique du trait de côte, l'évolution de la dynamique sédimentaire et la connaissance des phénomènes hydrodynamiques. Ces informations sont issues de la phase d'analyse du fonctionnement du littoral (cf. cahier technique sur l'analyse du fonctionnement du littoral).

Une bande de précaution est appliquée derrière la totalité des ouvrages de protection, identifiant ainsi les zones de forts écoulements en cas de brèche en d'autres points de localisation (cf. analyse menant à la caractérisation de l'aléa 2.4.4).

Lorsque la caractérisation de l'aléa est réalisée à partir d'un modèle numérique, une étude de plusieurs scénarios différant sur la localisation de la brèche peut être réalisée afin d'estimer l'impact engendré en aval de chacune des brèches testées (notion de « brèche glissante »). Les résultats de ces différents scénarios peuvent permettre notamment d'affiner cette bande de précaution et de réaliser la cartographie de l'aléa.

7 Plusieurs décennies

Prise en compte des ouvrages de second rang

La notion d'ouvrage de second rang correspond uniquement aux situations où l'ouvrage a été conçu ou aménagé en vue d'assurer une protection contre les inondations ou les submersions. A ce titre, il fait l'objet d'un classement selon les différentes catégories d'ouvrages hydrauliques existantes. La circonstance qu'un ouvrage ait un tel effet ne suffit pas à le faire regarder comme un ouvrage de protection, dès lors qu'il n'a pas été conçu ou aménagé à cette fin.

Dans les autres cas, il convient de retenir une autre qualification qu'ouvrage de second rang. A ce titre, les éléments et singularités topographiques constatés sur le territoire faisant l'objet du PPRL doivent être appréciés au cas par cas. Il revient aux services d'apprécier la situation locale et de qualifier chaque singularité topographique soit comme élément de topographie soit comme remblai, notamment en fonction de sa qualité naturelle ou anthropique, de ses dimensions et du comportement de cette singularité en cas de survenance de l'événement. Si cette singularité est identifiée comme un remblai, une démarche spécifique est à mettre en œuvre (cf. paragraphe Remblais).

En présence d'ouvrage de second rang, en l'état actuel des connaissances, aucune étude probante ne permet de retenir des hypothèses de défaillance différentes de celles des ouvrages de premier rang telles que posées précédemment. Il convient alors de caractériser les sollicitations hydrauliques particulières qu'il serait amené à connaître. Celles-ci seront nécessairement différentes par rapport aux ouvrages situés en front de mer. Dans le cas d'un système d'endiguement comportant plusieurs rangs, une analyse itérative de la possibilité de surverse des ouvrages des différents rangs au regard du niveau atteint en amont est à conduire. Dès qu'un rang d'ouvrages est défaillant (ruine généralisée ou brèche), le rang suivant doit ainsi faire l'objet d'une analyse afin de voir dans quelle mesure il est soumis à une action hydraulique (mise en charge, surverse…). Les hypothèses de défaillance sont à définir selon les mêmes critères que pour les ouvrages de premier rang. En présence d'un gestionnaire identifié, le comportement de l'ouvrage est déterminé en fonction des éléments techniques fournis par le gestionnaire. En l'absence de gestionnaire identifié, il convient de faire application des règles générales et forfaitaires prévues par la circulaire du 27 juillet 2011 précitées.
Cependant, en présence d'ouvrage de second rang, **il convient d'étudier les effets du comportement de l'ouvrage (tenue ou défaillance) sur l'aléa à l'amont et à l'aval de ce dernier.** Dans ce cas, non pas un seul scénario mais plusieurs sont à réaliser pour estimer l'aléa.

Lors de la caractérisation de l'aléa, deux scénarios au minimum sont à étudier en arrière d'un ouvrage de premier rang défaillant :

- l'ouvrage de second rang est fonctionnel et entraîne une hauteur de charge entre l'ouvrage de premier rang et celui-ci (mise en charge),
- l'ouvrage de second rang est défaillant et conduit à la submersion des terrains situés à l'arrière de l'ouvrage de second rang.

Cette analyse est à mener autant de fois qu'il existe de rang supplémentaire d'ouvrage. La cartographie de l'aléa de référence se base sur l'enveloppe de tous les scénarios étudiés et résulte donc de la prise en compte en tout point du territoire de l'aléa le plus pénalisant (hauteur ou couple hauteur/dynamique de submersion).

Enfin, comme pour tout ouvrage, il convient de déterminer une bande de précaution à l'arrière de l'ouvrage.

2 Les dispositifs hydrauliques

Les dispositifs de stockage, de drainage, de ressuyage ou d'évacuation des eaux (écluses, vannages, portes à flot…) ne sont pas considérés ici sous la dénomination « ouvrages ». Ces dispositifs ont un impact non négligeable sur la propagation des écoulements et donc sur l'inondation potentielle qui en résulte.

Étant conditionnés par une action humaine, mécanique ou électrique leur mobilisation pour atténuer l'effet de l'inondation n'est pas assurée par exemple lors d'événements météorologiques successifs, en cas de mauvais entretien, du fait de difficultés d'accès ou de pièce de rechange manquante... Un fonctionnement anormal de ces dispositifs et/ou pessimiste en termes d'inondation doit être pris en compte par défaut.
Ces dispositifs sont généralement intégrés à un système de protection plus complet. Ils peuvent constituer un point de vulnérabilité de ce système qui peut nécessiter d'être étudié plus spécifiquement dans le cadre d'une étude de danger. Lorsque des informations sur les défaillances possibles sont transmises par le gestionnaire, une autre hypothèse peut alors être retenue.

3 Les remblais

Les remblais (principalement d'infrastructures de transports : autoroute, voie ferrée), peuvent, ponctuellement et avec des effets variables, influer sur l'aléa d'inondation, soit en l'aggravant (obstacle à l'écoulement, rupture de la structure), soit en l'atténuant (limitation de l'extension de l'inondation ou des hauteurs d'eau sur certains secteurs).

Dans le cadre de l'élaboration d'un PPRL, ces remblais établis en zone inondable ou submersibles ne peuvent pas être considérés comme des ouvrages de protection contre les inondations ou les submersions sauf s'ils ont été conçus dès l'origine ou sont aménagés pour remplir cette fonction. Cette qualité de protection contre la submersion est identifiable au travers du classement qui a éventuellement été opéré. Dans ce cas, la méthode de prise en compte des ouvrages définies précédemment est appliquée.

Les remblais, qui ne sont pas des ouvrages de protection, ont cependant un impact sur la propagation des écoulements et donc sur l'inondation. Ils doivent donc faire l'objet d'une attention particulière. Leur impact à l'amont et à l'aval de l'écoulement doit être étudié selon différents scénarios.
Un scénario de non défaillance, considérant les remblais comme un élément de topographie, est systématiquement à étudier, étudiant ainsi les accumulations d'eau en amont (mise en charge), ainsi que les écoulements rapides potentiellement générés par les ouvertures existantes au niveau ou sous les remblais (drainages et rétablissements hydrauliques).
De plus, **a minima un scénario de défaillance est à étudier**. Les hypothèses de défaillance retenues peuvent s'inspirer des hypothèses proposées pour les ouvrages de protection (cf. « Les ouvrages de protection » supra).

La cartographie de l'aléa résulte de la combinaison la plus défavorable issue des deux scénarios étudiés précédemment (enveloppe des scénarios étudiés par la prise en compte en tout point du territoire de l'aléa le plus pénalisant)**.** Des bandes de précaution, identifiant les lieux potentiellement impactés par des vitesses importantes du fait des défaillances, telles que définies pour les ouvrages, peuvent être retenues si nécessaire.

4 Les cordons naturels

Les cordons naturels (dunes et cordons de galets) sont des éléments naturels dont l'évolution morphologique est dynamique. Leur forme s'adapte ainsi en permanence aux conditions météorologiques et hydro-sédimentaires qu'ils subissent. Les cordons naturels, séparant des zones topographiques basses de la mer, peuvent donc influer sur l'aléa de submersion, soit en jouant un rôle contre la submersion marine en limitant les entrées d'eau et en atténuant l'énergie des vagues, soit en l'aggravant du fait des entrées d'eau générées par leur disparition partielle ou totale lors d'un événement tempétueux. Il est donc nécessaire, lors de la caractérisation de l'aléa submersion marine, de prendre en compte ces comportements et impacts potentiels.

A l'instar du processus prévu pour les ouvrages hydrauliques, des défaillances sont à envisager de manière générale pour les cordons dunaires (cf. Illustration 51). Un choix entre les deux situations suivantes est alors à réaliser :

- une ruine généralisée du cordon : Un effacement complet est systématiquement retenu dès lors que l'événement de référence surverse le cordon considéré (et cela dès le premier cm de surverse) ou qu'il est franchi de manière continue.

- Une détérioration du cordon matérialisée par des brèches :

Leurs caractéristiques sont définies en s'appuyant sur des éléments de connaissance des événements historiques. Leurs positions tiennent compte des points de faiblesse du cordon (éléments de topographie, épaisseur du cordon, faiblesses structurelles …). Des hypothèses de défaillance forfaitaires peuvent être retenues. Une largeur de brèche de 100 m par défaut peut être retenue sauf s'il a été fait état de brèches plus importantes par le passé.

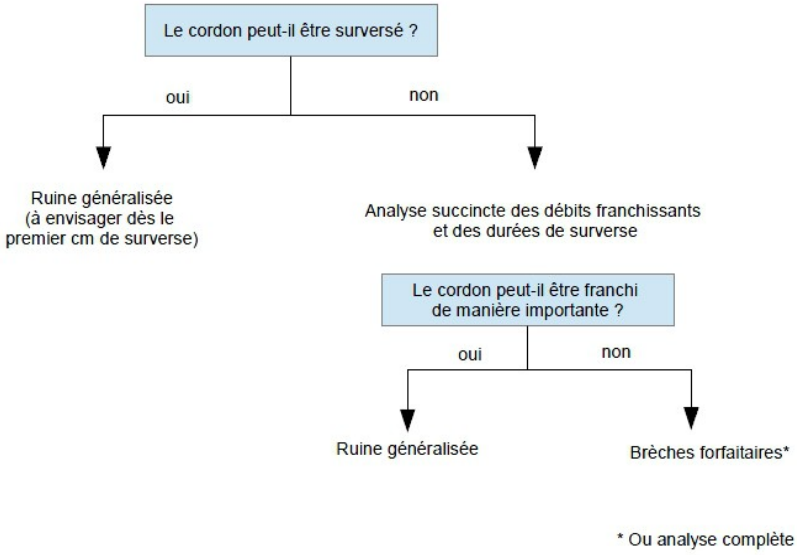


Illustration 51 : Démarche simplifiée de prise en compte des cordons dunaires

Comme pour un ouvrage, lorsque ces défaillances sont envisagées, des bandes de précaution doivent être identifiées derrière les cordons naturels. En effet, une rupture ou une surverse brutale peut entraîner des vitesses d'écoulement importantes. Ces bandes ont les mêmes caractéristiques pour les ouvrages de protection (cf. 2.4.4.d Bande de précaution relative aux ouvrages de protection) et sont appliquées à partir de la crête du cordon.

Dans le cas d'une situation hydro-sédimentaire stable et d'un cordon présentant des dimensions importantes (cote de crête élevée sans discontinuité, base de plusieurs dizaines voire centaines de mètres), en absence d'informations historiques de faiblesse du cordon, une analyse plus poussée peut être mise en œuvre pour déterminer les hypothèses à prendre en compte.

Pour l'élaboration de la carte d'aléa submersion marine à échéance 100 ans, la position du trait de côte et la morphologie du cordon à échéance 100 ans sont à considérer. Il convient pour cela de bien analyser la situation actuelle (possibilité de maintien du stock sédimentaire du cordon...) et de prendre en compte si besoin des hypothèses pessimistes sur les conditions futures (modification des conditions hydrodynamiques du fait de l'élévation du niveau de la mer pouvant générer des situations d'érosion nouvelles, arrêt d'alimentation des cordons du fait de pénuries de sédiments…).

2.4.4 - Choix de la méthode de caractérisation et de cartographie de l'aléa

L'objectif est de cartographier et de caractériser l'aléa de submersion marine à partir des scénarios retenus. Sur le bassin de risque, les hauteurs d'eau (m), les vitesses d'écoulement (m/s) et la rapidité de submersion (m/min) doivent être quantifiées ou qualifiées. **Plusieurs types de méthodes sont possibles pour déterminer les caractéristiques de l'aléa** :

- la superposition du niveau marin de référence à la topographie,
- la répartition des volumes entrants sur la topographie,
- l'utilisation de modèles numériques.

Pou réaliser les analyses mentionnées, des données topographiques précises sont nécessaires afin de disposer d'un modèle numérique de terrain adéquat. La méthode de superposition du niveau marin à la topographie doit systématiquement être mise en œuvre. Elle peut apparaître comme non suffisante pour aboutir à la réalisation de la cartographie de l'aléa mais est dans ce cas une étape d'analyse et de compréhension de l'aléa indispensable.

Le choix de la méthode dépend principalement des caractéristiques du site et des données disponibles. La démarche menant à ce choix, présentée de manière simplifiée ci-dessous (cf. Illustration 52), est détaillée dans les descriptions des 3 méthodes. Pour chacune des méthodes, une succession d'étapes d'analyse et de mise en œuvre d'outils permet d'atteindre cet objectif.

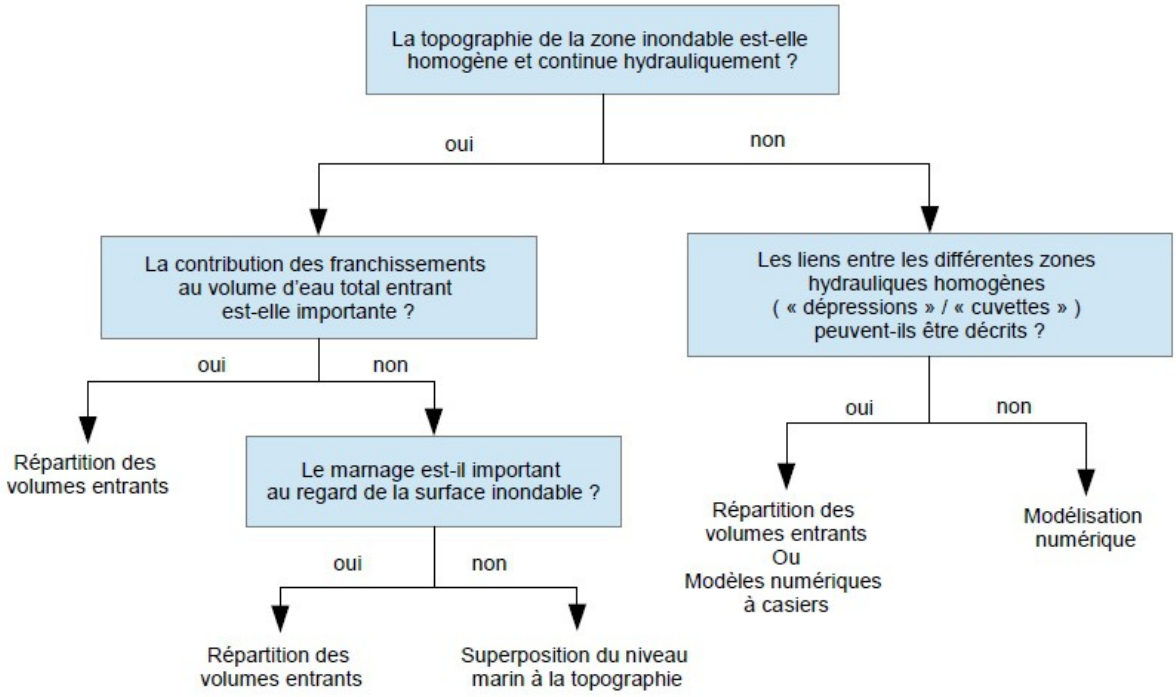


Illustration 52 : Démarche simplifiée de choix de la méthode de caractérisation de l'aléa submersion marine

2.4.4.a - Superposition du niveau marin de référence à la topographie

La méthode consistant à superposer le niveau marin de référence au relevé topographique reste d'actualité pour appréhender de façon simple les zones soumises à la submersion marine. Recommandée dans le guide méthodologique de 1997, elle est dans de nombreux cas suffisante pour approcher la zone sou-

mise à l'aléa submersion marine (cf. Encart 25). Cette méthode doit donc systématiquement être mise en œuvre.

Une analyse de la cartographie produite est ensuite à réaliser pour déterminer si des études plus détaillées doivent être mises en œuvre pour prendre en compte certaines caractéristiques du site :

- comparaison de la cartographie obtenue avec les zones inondées par les événements historiques connus, les informations fournies par les cartes anciennes et les cartes géologiques,
- identification des secteurs inondables par paquets de mer et analyse de l'importance de ce mode de submersion au regard du débordement ou de la rupture,
- analyse du rôle des systèmes de drainage, de stockage et d'évacuation et des obstacles à l'écoulement (topographie et structures naturelles de protection, ouvrages de protection, remblais…) sur le volume total entrant, cette méthode ne permettant pas de prendre en compte le rôle d'obstacle à l'écoulement des ouvrages,
- analyse de la surface de la zone potentiellement inondable au regard des variations du niveau d'eau dues à la marée.

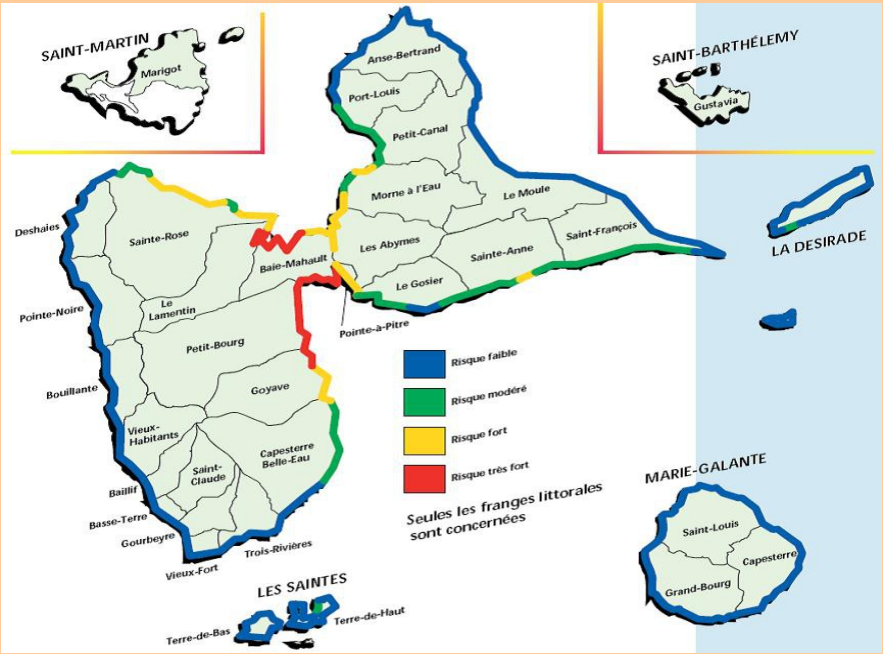
Pour ce dernier point, qui a pour objectifs d'estimer dans quelle mesure les volumes entrants peuvent être surestimés par cette méthode et déterminer si une autre méthode de cartographie est plus appropriée, un calcul du volume représentant l'espace entre la simple projection du niveau marin de référence et la topographie peut être mené. Ce volume peut être comparé aux potentialités d'apports d'eau sur l'ensemble du linéaire entre terre et mer lors de deux cycles de marée, ou plus en fonction du fonctionnement hydraulique du site. Le calcul peut mettre en œuvre une loi de seuil à partir du niveau marin de référence et du niveau altimétrique du linéaire du trait de côte (cf. Encart 13). Un niveau altimétrique moyen plutôt défavorable est à privilégier (sans ouvrage par exemple).

L'analyse peut conclure que la méthode de superposition du niveau marin de référence à la topographie est suffisante pour la détermination de l'aléa submersion marine et n'appelle pas la mise en œuvre d'outils complémentaires. Dans ce cas, les zones situées sous le niveau marin de référence conduisent, sous réserve d'une analyse finale (cf. analyses menant à la caractérisation de l'aléa infra 2.4.4.d), à la détermination de la zone soumise à l'aléa submersion marine. Dans les autres cas, d'autres méthodes et outils doivent être mobilisés pour apporter les compléments nécessaires.

Encart 25 : Présentation des méthodes de caractérisation utilisées en Guadeloupe et son archipel (BRGM)

Les PPRN « submersion » de Guadeloupe se basent sur les atlas communaux des risques naturels – aléa cyclonique établis dans les années 1990 (Sedan *et al.*, 1998). Les phénomènes considérés dans le calcul de la submersion sont les vagues, la surcote atmosphérique d'origine cyclonique et la marée prédite.

L'identification des zones soumises à la submersion sont déterminées par la superposition d'un niveau marin de référence à la topographie. Les valeurs des surcotes atmosphériques retenues pour l'ensemble des côtes de la Guadeloupe et de son archipel ont été établies par Météo-France suivant 3 phases (Perret *et al.*, 1996) :
1) Étude des cyclones historiques passant à moins de 100 miles nautiques de la Guadeloupe sur la période 1944-1993.
2) Modélisation numérique des surcotes atmosphériques générées par un nombre de 1332 cyclones synthétiques établis en faisant varier 5 paramètres clés : distance par rapport à la Guadeloupe, intensité du vent (allant d'une tempête tropicale forte à un ouragan de classe 5), le rayon des vents de 34 nœuds, la direction et la vitesse de déplacement du cyclone. Les valeurs plausibles pour chacun de ces paramètres sont issues de l'étude historique précédente.
3) La compilation de l'ensemble des résultats dans une carte unique « de risque de surcote » en fonction de l'intensité du cyclone :



Risque/intensité	50	60	70	80	90	100	110	120	130	135
Risque faible	5 à 15	10 à 20	15 à 30	20 à 40	25 à 45	30 à 55	35 à 65	40 à 80	50 à 90	55 à 100
Risque modéré	15 à 30	20 à 45	30 à 60	40 à 80	45 à 90	55 à 110	65 à 130	80 à 150	90 à 170	100 à 200
Risque fort	30 à 50	45 à 70	60 à 100	80 à 120	90 à 150	110 à 180	130 à 220	150 à 250	170 à 270	200 à 300
Risque très fort	50 à 100	70 à 130	100 à 160	120 à 200	150 à 230	180 à 270	220 à 320	250 à 380	270 à 420	> 300

Illustration 53 : « Risque de surcote » le long des côtes guadeloupéennes et correspondance avec l'intensité des surcotes (en cm) en fonction de l'intensité du vent (en nœuds) (Perret et al., 1996).

L'impact des vagues est principalement pris en compte suite au retour d'expérience des ouragans Luis et Marilyne qui ont affecté la Guadeloupe et son archipel en 1995. Ce travail a permis de définir la largeur des zones exposées à l'impact des vagues cycloniques suivant la nature géologique du rivage, les protections artificielles et la présence ou non de barrière récifale. La largeur de ces zones est de :
- 10 m : pour un littoral rocheux surélevé d'au moins un à deux mètres ;
- 20 m : pour un littoral protégé (enrochements, mur béton). Diminution de la largeur en présence d'une barrière corallienne ;
- 50 m : pour une plage (susceptible d'être érodée), la largeur pouvant être diminuée en présence d'une barrière corallienne.

La cartographie de l'aléa submersion marine tient compte de deux niveaux d'aléa :
- Aléa fort : zones touchées par plus d'1 m d'eau et zones exposées à l'impact des vagues, situées entre 10 et 50 m du trait de côte en fonction des caractéristiques géologiques du rivage, de l'existence de barrières récifales et d'ouvrages de protection ;
- Aléa moyen : zones touchées par des hauteurs d'eau comprises entre 0,5 m et 1 m d'eau.

Une adaptation de cette méthode a été développée dans le cadre de l'étude préalable au PPRL Marais d'Yves-Estuaire Charente pour prendre en compte la spécificité des marais présentant des ouvrages de protection successifs faisant obstacle à l'écoulement (cf. Encart 26). Une atténuation progressive du niveau marin dans les terres, par rapport au niveau marin de référence à la côte, a été prise en compte, afin d'intégrer les multiples obstacles à l'écoulement rencontrés par les eaux marines lors de l'envahissement du continent. Cette atténuation repose sur celle constatée lors d'un événement historique significatif. La mise en œuvre de cette méthode

est donc contrainte par la nécessité de disposer de nombreux relevés d'inondations historiques, répartis sur l'ensemble du secteur d'étude.

Encart 26 : Méthode de caractérisation de l'aléa submersion marine retenue dans le cadre de l'élaboration du PPR de l'estuaire de la Charente – Marais d'Yves – Ile d'Aix (CETE du Sud-Ouest)

L'étude préalable à l'élaboration du PPR a été menée au début des années 2000. La méthode de caractérisation de l'aléa submersion marine, présentée ci-dessous, a été développée dans le cadre de cette étude (CETE Sud-Ouest, 2003-2006). La cartographie de l'aléa « submersion marine » a été établie à partir d'une définition empirique des hauteurs d'eau à terre, découlant de la connaissance des niveaux marins de référence et de la topographie en tout point du territoire du périmètre d'étude. Elle se décompose en 4 phases.

Phase 1 : Détermination des niveaux marins de référence
Les niveaux marins de référence par commune au droit du rivage ont été fournis par le Maître d'Ouvrage. Ils ont été calculés en se référant à un événement historique, la tempête du 27 décembre 1999 (Tempête Martin).

COMMUNES	PHEM de référence (en m IGN69)
ILE-D'AIX	4,3
BREUIL-MAGNE	4,5
CABARIOT	4,4
ECHILLAIS	4,5
FOURAS	4,6
PORT-DES-BARQUES	4,4
ROCHEFORT	4,4
SAINT-HIPPOLYTE	4,4
SAINT-LAURENT-DE-LA-PREE	4,5
SAINT-NAZAIRE-SUR-CHARENTE	4,3
SOUBISE	4,4
TONNAY-CHARENTE	4,5
YVES	4,5
VERGEROUX	4,6

Illustration 54 : Les niveaux marins de référence retenus dans le PPR Estuaire de la Charente – Marais d'Yves – Ile d'Aix

Phase 2 : Détermination des cotes d'eau à terre
Les cotes d'eau à terre pour les niveaux marins de référence ont été définies à partir des hauteurs d'eau mesurées lors de la tempête Martin à l'intérieur des terres. L'atténuation des cotes d'eau à terre retenue pour l'événement de référence est définie d'après la variation des hauteurs d'eau de part et d'autres d'obstacles aux écoulements (remblais routiers ou voies ferrées, murs…) pour cet événement historique.

L'atténuation des cotes d'eau, en fonction de la distance du littoral, a été calculée après analyse :
- des atténuations constatées lors de la tempête du 27 décembre 1999,
- de la topographie et de l'occupation du sol qui peuvent faire barrage à l'écoulement des eaux (routes, remblais, zone urbanisée avec habitations ou murets…), ainsi que des champs d'expansion des crues (marais, zones agricoles).

A titre d'exemple, le tableau suivant présente, sur la commune de Yves, les cotes altimétriques de mesures ou de témoignages de laisses de submersion de la tempête du 27 décembre 1999 avec leur contexte environnemental.

Lieu dit	Cote eau tempête 1999 (en m IGN69)	Contexte environnemental			
		Exposition par rapport aux éléments naturels	Eloignement du point par rapport à la côte	Présence et état des systèmes de protection au droit du point de mesure	Environnement géo-morphologique
A l'Est de Port Punay	3,87	Exposé aux vents dominants	700 m	Digues béton et enrochement, submergées avec destruction de la crête	Point situé dans le marais, protégé par une zone haute (colonie de vacances)
Au sud de l'aire du Marrouillet	4,26	Exposé à la houle et aux vents dominants	400 m	Cordon dunaire submergé dans sa totalité	Point situé en bordure du marais
Les Chaudières	3,66	Exposé aux vents dominants	600 m	Cordon dunaire submergé dans sa totalité	Point situé sur la RN 137, avec en bordure un marais drainé par des fossés

Illustration 55 : Cotes altimétriques des laisses de submersion de la tempête 1999 sur la commune de Yves

Ce travail a conduit à l'élaboration de la carte des cotes de référence, notamment sur la commune de Yves (cf. Illustration 56).

Cette carte représente les secteurs homogènes ayant des cotes d'eau équivalentes (notion de casier hydraulique). Cet exemple montre, d'ouest en est, une succession de casiers :
1. un premier casier coté à 4,5 m IGN69 correspond au niveau marin de référence (cf. Illustration 54) qui s'étend du trait de côte jusqu'à une bosse topographique (merlon et endiguement de terre),
2. un deuxième casier coté à 4,3 m IGN69 (atténuation de 20 cm) qui s'étend jusqu'au remblai de la voie SNCF,
3. un troisième casier coté à 4,1 m IGN69 qui se prolonge jusqu'au remblai de la route RN137,
4. un quatrième casier coté à 4 m IGN69 qui se propage vers le marais, le champ d'expansion de la submersion.

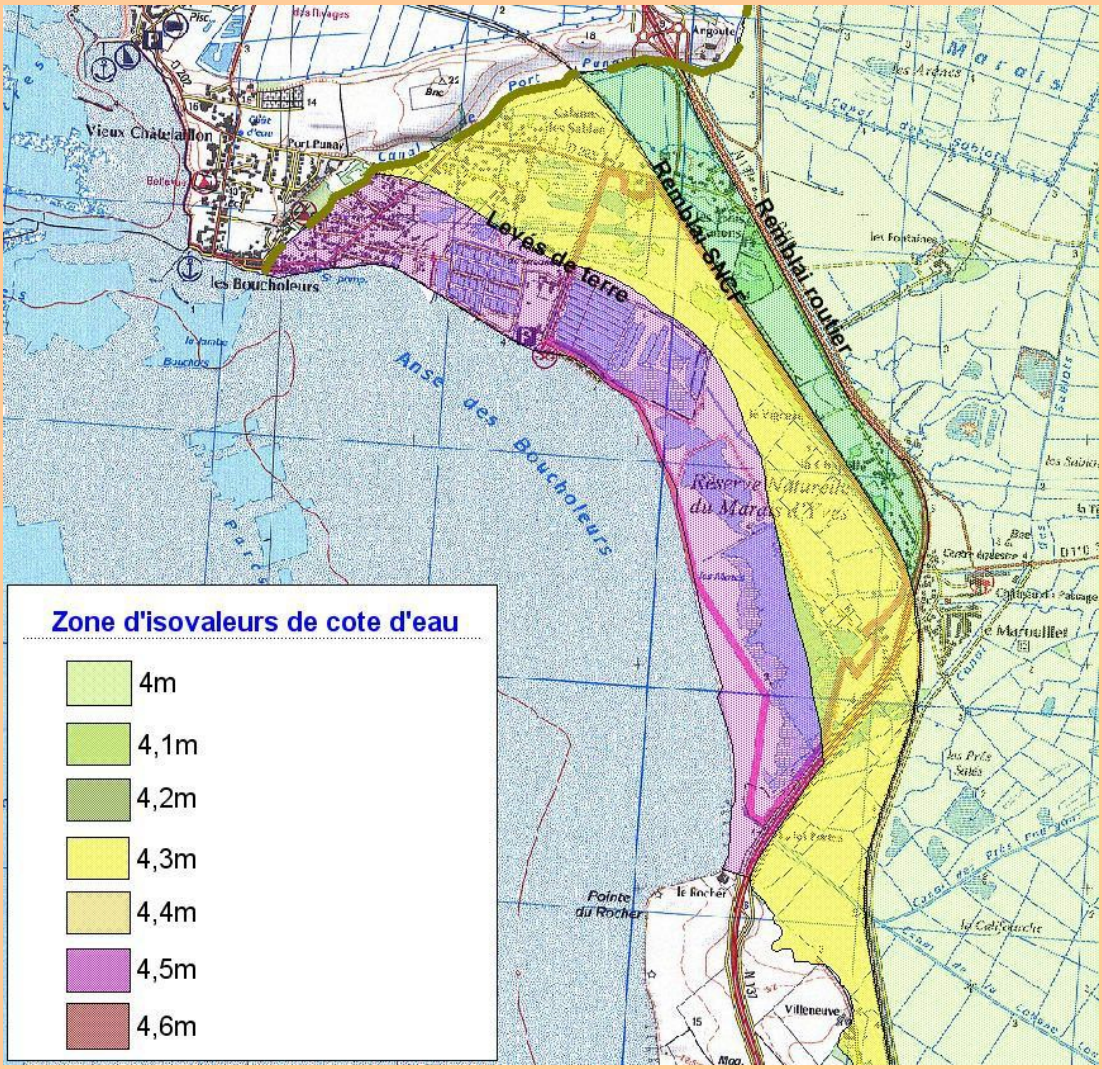


Illustration 56 : Extrait de la carte des isovaleurs de cotes d'eau de la commune de Yves

Phase 3 : Calcul des hauteurs d'eau

Le calcul des hauteurs d'eau résulte de la soustraction des cotes d'eau à terre, issues de la carte des isovaleurs de cotes d'eau, des points topographiques correspondants.

Le principe de la définition des hauteurs d'eau est le suivant :

- *Création d'un modèle numérique de terrain (MNT)* à partir du MNT de la BD Topo de l'IGN (maillage 25m) en intégrant les points topographiques du terrain naturel corrigés dans les zones en remblais (route, voie SNCF, micro relief) à partir des données topographiques existantes (levés topographiques remis par les mairies, les services de l'État ou des particuliers, levés topographiques complémentaires spécifiques réalisés par méthode photogrammétrique avec prises de vues aériennes à l'échelle 1/4 000ème, par des levés terrestres avec des dGPS de précision centimétrique ou des levés aéroportés de type lidar haute densité). Ce modèle numérique est une grille de points géoréférencés (X, Y et Z).
- *Validation du modèle numérique de terrain* ainsi obtenu à partir de nombreux contrôles sur le terrain (contrôles visuels, levés terrestres par théodolite, nouvelles données de particuliers transmises par les mairies).
- *Création du plan d'eau statique* (cf. Illustration 56). Ce plan d'eau est représenté par une grille de points auxquels sont attribuées les valeurs des cotes d'eau à terre.
- *Calcul des hauteurs d'eau.* La soustraction des points de la grille MNT correspondant avec les points de la grille du plan d'eau statique a été réalisé par le logiciel Vertical Mapper. La soustraction des deux modèles nu-

mériques aboutit à un modèle numérique des hauteurs d'eau (grille de points contenant les valeurs des hauteurs d'eau). Une illustration de la grille des hauteurs d'eau obtenue sur l'Ile d'Aix est présentée ci-dessous (cf. Illustration 57).

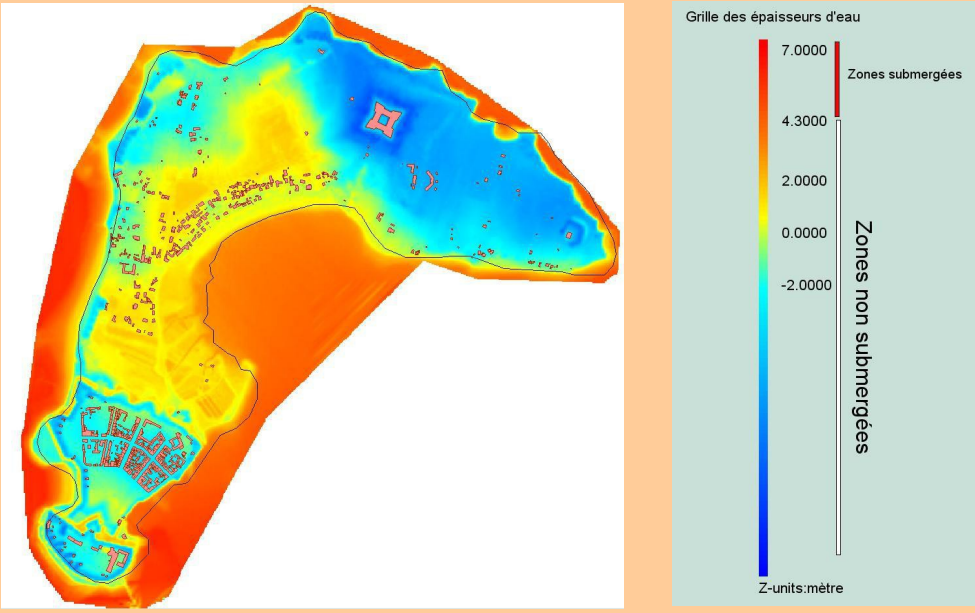


Illustration 57 : Carte des hauteurs d'eau de la commune de île d'Aix

Phase 4 : Création des contours de zones d'isovaleurs de hauteur d'eau
La grille des hauteurs d'eau ainsi calculée a subi un traitement permettant de créer des surfaces d'égale hauteur avec des pas de 0,5 m. Trois tranches d'eau ont été ainsi définies :
- de 0 à 0,5 m,
- de 0,5 m à 1 m,
- et supérieure à 1 m.

La cartographie de l'aléa submersion marine a été réalisée à partir de la carte des hauteurs d'eau par tranches et d'une analyse de la dynamique de submersion.

2.4.4.b - Répartition topographique des volumes entrants sur la topographie

Lorsque les volumes entrants sont surestimés par la méthode de superposition du niveau marin à la topographie (marnage important ou obstacles à l'écoulement) et où la topographie arrière-littorale n'est pas trop complexe, c'est-à-dire s'il n'y a qu'une seule dépression, ou un nombre limité de dépressions dont les relations entre elles sont connues, une méthode simple peut être mise en œuvre. Les volumes entrants, par débordement (cf. Encart 13) et par franchissement par paquets de mer (cf. Encart 14), doivent dans ce cas être estimés.

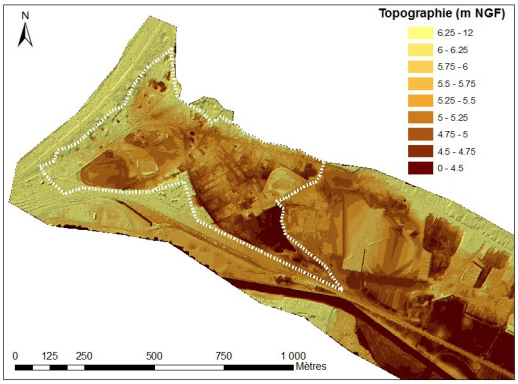
Les zones inondées peuvent être déterminées via un outil SIG capable de calculer les volumes. La surface de l'eau de la zone inondée est alors considéré comme horizontale, les zones les plus basses sont considérées comme étant les premières remplies. Le volume compris entre le niveau du plan d'eau inondé et la topographie est égal aux volumes d'eau entrants (cf. Encart 27). Les zones basses (« cuvettes ») les plus proches de la côte sont les premières remplies.

Encart 27 : Méthodologie de caractérisation de l'aléa submersion marine au Tréport (CETE Normandie-Centre)

L'élaboration de la carte d'aléa submersion marine du PPR de Mers-les-Bains/Eu/Le Tréport repose sur la doctrine issue de la circulaire du 27 juillet 2011 relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les PPRL. Elle s'appuie par ailleurs sur une compréhension fine des mécanismes de submersion marine propres à la zone d'étude. Cela permet à la fois d'augmenter la fiabilité de l'étude tout en facilitant l'appropriation par les élus.

Une méthodologie spécifique à cette partie du site a été développée afin de caractériser les aléas. Cette méthode repose sur deux étapes : une estimation des volumes entrants par franchissement, puis, la détermination de leurs impacts à terre. Les données historiques, et plus particulièrement l'événement de février 1990, ont été exploitées afin de caler et valider la méthodologie retenue.

L'analyse préalable du site a mis en exergue l'existence d'une zone basse d'accumulation de la submersion marine. Il a ainsi été proposé de définir la zone soumise à aléa par remplissage de cette dépression par les volumes entrants en partant des points les plus bas, le plan d'eau de la zone inondée étant à une cote unique. Cette méthode, beaucoup plus simple et rapide que l'utilisation d'un modèle hydraulique numérique, ne s'applique que dans des situations où une zone basse est facilement identifiable. Il est possible d'identifier plusieurs zones basses à condition de pouvoir définir la dynamique qui lie les dépressions entre elles (seuils bien identifiés par exemple). On converge dans ce cas vers l'utilisation d'un modèle numérique à casiers (cf. utilisation de modèles numériques infra). Un MNT précis est nécessaire pour aider à la bonne compréhension du fonctionnement hydraulique du site. Dans ce cas précis, il a été obtenu à partir de données LIDAR.



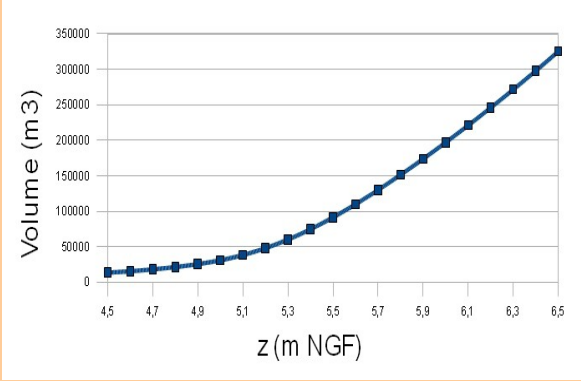


Illustration 58 : Dépression (figurée par un liseré blanc) repérée par la topographie et les laisses de l'inondation de février 1990 (à gauche) et loi cote/volume associée à cette zone (à droite). Source : CETE Normandie-Centre

Dans le cas d'une dépression unique, la méthode est simple. Des outils SIG tels que ArcGis ou Qgis permettent de calculer, à partir d'un MNT, le volume situé au-dessous d'un plan d'eau. En n'analysant que cette dépression, les zones ne pouvant hydrauliquement pas être remplies n'étant ainsi pas considérées, une loi qui fournit en fonction d'une cote du plan d'eau le volume associé peut être définie. Le volume franchissant étant connu, la cote du plan d'eau peut ainsi être retrouvée.

Dans un premier temps, l'événement de 1990 a permis de valider cette méthode. D'une part, les volumes franchissants ont été estimés à partir des conditions de houle (données ANEMOC) et de niveau marin (mesures du

port de Dieppe). D'autre part, les laisses de l'inondation ont permis d'évaluer la cote moyenne du plan d'eau formé lors de la submersion et de calculer le volume d'eau ayant effectivement franchi les ouvrages en 1990. La comparaison entre ces deux volumes a donné des résultats très encourageants permettant d'assurer que la méthode utilisée était fiable.

Les volumes franchis pour l'événement de référence (événement centennal défini par un couple niveau marin/hauteur de vagues) ont ensuite été calculés puis, par exploitation du MNT, la cote du plan d'eau correspondant à ce nouveau volume franchi a été définie. La carte d'aléa a ainsi pu être dressée. Les zones de transit des franchissements vers la zone basse, non identifiées dans ce premier temps, ont été repérées puis qualifiées d'aléa fort à cause des fortes vitesses d'écoulement. Dans la zone d'accumulation, les vitesses d'écoulement sont faibles et la qualification de l'aléa dépend alors uniquement de la hauteur d'eau. La vitesse de montée des eaux peut être considérée comme faible sur l'ensemble du secteur du fait d'entrées progressives des eaux liées aux franchissements.

2.4.4.c - Utilisation de modèles numériques

1 Généralités

Dans les cas les plus complexes, les méthodes citées précédemment ne sont pas adaptées et le recours à la modélisation numérique peut être nécessaire. Différents types de modèles numériques existent : modèles bidimensionnels, modèles à casiers, modèles vague à vague. Le choix du modèle repose sur plusieurs critères.

Les modèles à casiers demandent une très bonne compréhension du fonctionnement du site. Ils donnent une bonne représentation de la répartition finale des volumes mais reproduisent mal la dynamique : l'information des vitesses d'écoulement est uniquement donnée à la limite des casiers et le modèle ne fournit pas d'information sur la vitesse de montée des eaux, la vitesse de propagation de l'onde n'est pas représentée. Les modèles à casiers ne permettent pas de distinguer les secteurs qui seraient un lieu de passage des écoulements de ceux assurant un stockage de l'eau. Dans le cas où la zone littorale comprend quelques dépressions bien identifiées, un modèle de casier simple peut être mis en œuvre. Les polders, étangs ou zones confinées, considérés comme des casiers, ont entre eux et avec l'extérieur des relations pouvant être reproduites par des lois de seuils (pouvant intégrer à la fois le mode dénoyé et noyé). Des modélisations simples, pour lesquelles des outils gratuits sont disponibles (Mascaret, HEC-RAS), facilitées par la généralisation de levé topographique de qualité, peuvent alors être adaptées et suffisantes pour décrire le fonctionnement hydraulique. L'image ci-dessous montre un exemple théorique (cf. Illustration 59). La mer est en lien avec trois zones à l'arrière, dont les relations peuvent être représentées au travers de différentes lois de seuil (cf. Encart 13), les zones pouvant, elles aussi, communiquer entre elles. Cette modélisation simplifiée permet une compréhension des remplissages successifs des casiers identifiés, des vidanges à basse mer et ainsi l'influence de marées successives. Elle n'intègre cependant pas les impacts des vagues et du vent.

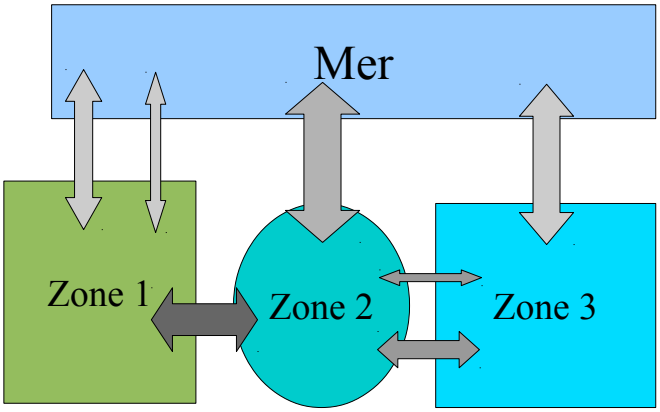


Illustration 59 : Schématisation d'un modèle à casier

L'utilisation des modèles bi-dimensionnels est opportune dès qu'une appréciation de la dynamique est nécessaire ou lorsque le fonctionnement du site est complexe et difficile à appréhender (cf. Encart 28). Ce type de modèle peut prendre en compte le vent pour le calcul de clapot ou de bascule d'un plan d'eau liée au vent. Les temps de calcul sont cependant plus longs que pour le modèle à casiers.

La réalisation d'un modèle numérique demande :

- une identification des points d'entrée d'eau et des conditions associées : niveaux, débits… Un niveau d'eau est appliqué en entrée de modèle. Il peut être variable dans le temps selon le marnage, la durée de la tempête et son impact sur un nombre de cycles de marée. Il est recommandé de réaliser les simulations sur deux pleines mers minimum, le niveau marin de référence étant appliqué à la première pleine mer. Lorsque des courbes intensité/durée/fréquence des données d'entrée sont disponibles, elles peuvent être utilisées.
- une identification des principaux obstacles à l'écoulement que sont les digues de premier et de second rangs, les cordons naturels, les remblais d'infrastructure (et leurs éventuelles transparences par réseau ou autre passage), etc.
- une analyse du fonctionnement du site et une déduction des lieux d'écoulements préférentiels (dans le cas d'un modèle à casiers).

La mise en œuvre de modèles numériques nécessite une phase de calage afin d'adapter l'ensemble des paramètres (frottement, résolution de la topographie, prise en compte du bâti, prise en compte des ouvrages de protection ou d'autres obstacles…) au site. Ce calage implique de recourir à l'exploitation d'un événement particulier fournissant des données d'entrée et des conséquences en termes d'inondation. Plus les données disponibles pour cet événement sont nombreuses, plus le calage peut être fin. **Des études de sensibilité peuvent également être réalisées pour chaque hypothèse**. Lorsque des données de calage ne sont pas disponibles et/ou lorsque les études de sensibilité ne permettent pas de se prononcer, les hypothèses qui sont faites doivent privilégier la sécurité. Cette analyse permet alors d'identifier la sensibilité des résultats aux différents paramètres et ainsi de qualifier l'incertitude associée.

Encart 28 : Présentation des méthodes de caractérisation utilisées en Polynésie Française (BRGM)

PPRN submersion marine actuels :
Les 48 communes que compte la Polynésie Française sont dotées de PPR submersion marine. En 2012, un seul de ces PPR avait été approuvé (commune de Punaauia), les autres sont en cours d'instruction. Ces PPR

ont été établis dans le cadre du programme ARAI 1 (Aléa, Risques, Aménagement et Information), conçu en partenariat entre la Polynésie Française et le BRGM (2002-2006).

La cartographie de l'aléa submersion marine se base sur le croisement de la topographie avec un niveau de référence intégrant la marée, la surcote atmosphérique, la surcote liée aux vagues (wave setup) et l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique. A noter que l'impact des vagues est également considéré dans la cartographie de l'aléa.

Les valeurs de la surcote atmosphérique et de la surcote liée aux vagues ont été établies sur la base des événements historiques cycloniques paroxysmaux enregistrés depuis 1970 uniquement (pas de période de retour associée). La méthodologie mise en place fait appel aux observations et à la modélisation numérique des surcôtes atmosphériques cycloniques (Météo-France, Daniel et Poitevin, 1995) et à la modélisation de la surcote liée aux vagues cycloniques (BRGM, Pedreros, 2006).

Les niveaux de référence ainsi établis varient de 1 à 2,5 m sur les différents archipels à l'exception des Tuamotu (atolls) où ces niveaux atteignent 4 à 5 m.

Trois niveaux d'aléa sont considérés :
- Aléa fort : Zones soumises à des hauteurs d'eau supérieures à 1 m ou zones soumises à l'impact des vagues, sur 10 mètres (au droit du récif), 20 mètres (au droit d'une passe ou en absence de lagon) ou 30 mètres d'extension à partir de la première ligne de végétation ;
- Aléa moyen : Zones soumises à des hauteurs d'eau comprises entre 0,5 m et 1 m ;
- Aléa faible : Zones soumises à des hauteurs d'eau inférieures à 0,5 m.

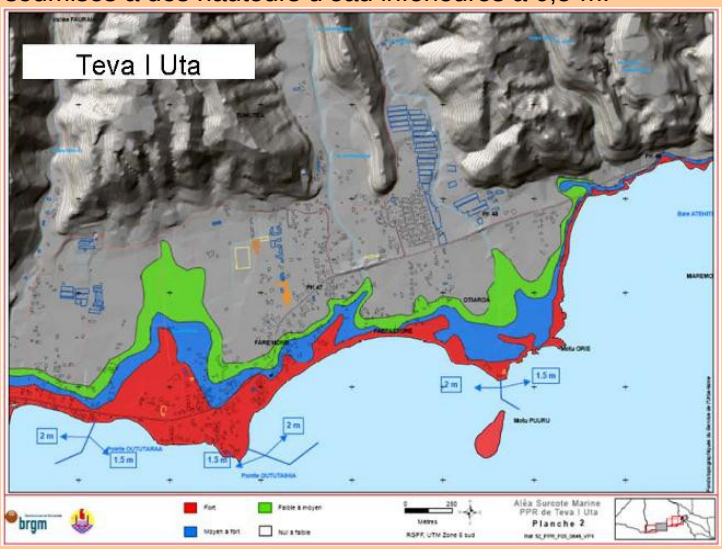
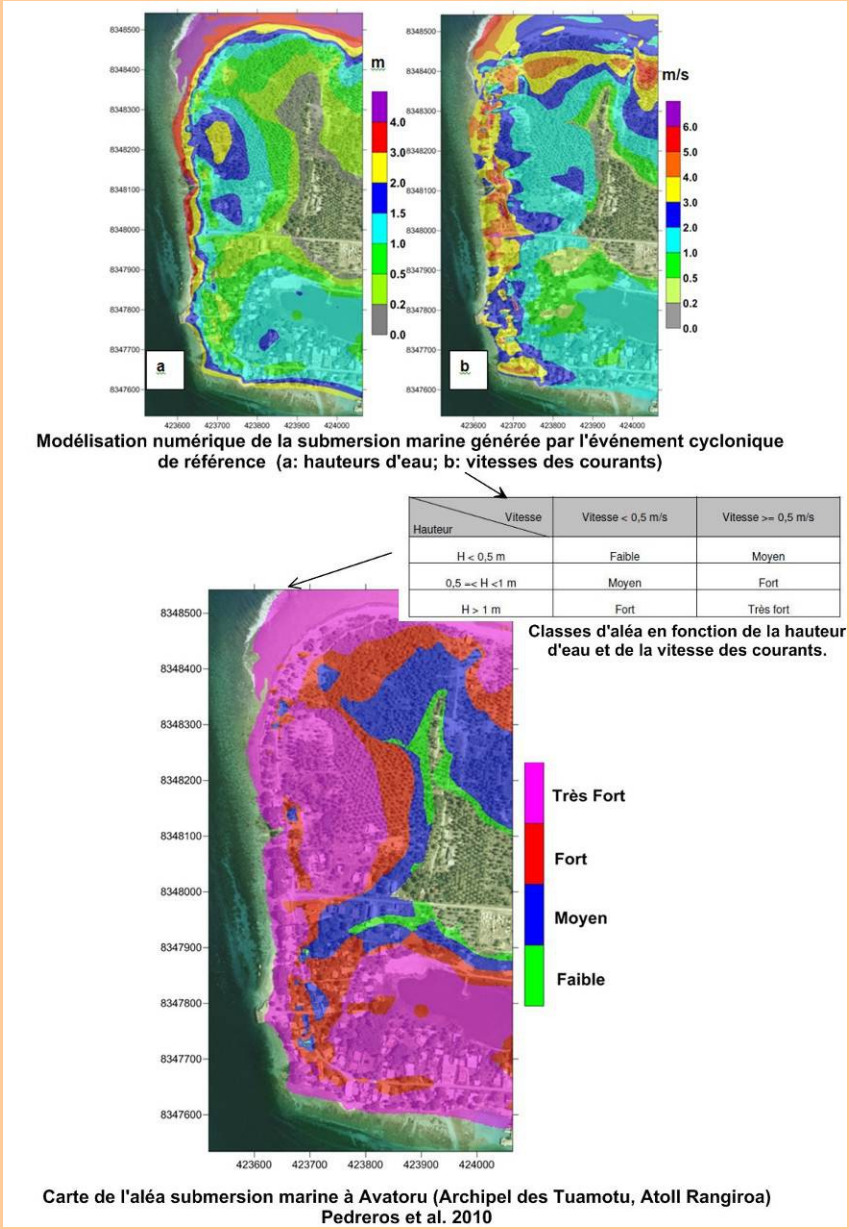


Illustration 60 : Exemple de la cartographie de l'aléa submersion marine

Amélioration du zonage de l'aléa submersion marine en Polynésie Française – Programmes ARAI2 et ARAI3
Depuis ARAI1, des améliorations de la méthodologie de l'évaluation de l'aléa submersion marine ont été proposées dans le cadre des programmes ARAI2 (2008-2010) et ARAI3 (2010-2012). Celles-ci concernent :

1) La méthode de propagation à terre de la submersion marine (ARAI2) : La cartographie de l'aléa submersion marine par croisement d'un niveau de référence et de la topographie s'adapte mal au contexte polynésien.

En effet, les volumes entrants par franchissements sont importants et la forme des fonds complexe : présence de récifs barrières et frangeants, lagons, passes, motus (petits îlots formés sur la barrière de corail entourant un lagon), levés détritiques, etc. Il est donc utile dans ce cas de faire appel à la modélisation numérique avec des codes type « vague à vague ». La modélisation donne accès à la dynamique de la submersion en fournissant les hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement à terre. Les niveaux d'aléa ont été définis en fonction des couples hauteur/vitesse (cf. Illustration 61). La zone soumise à l'impact des vagues est contenue dans les zones de niveau d'aléa fort.



Hauteur \ Vitesse	Vitesse < 0,5 m/s	Vitesse >= 0,5 m/s
H < 0,5 m	Faible	Moyen
0,5 =< H <1 m	Moyen	Fort
H > 1 m	Fort	Très fort

Illustration 61 : Cartographie de l'aléa submersion marine à Avatoru (Archipel des Tuamotu, Atoll Rangiroa) (Source : Pedreros et al., 2010)

2) La définition des périodes de retour (ARAI3) : une approche probabiliste (calcul des probabilités conjointes) est en cours de développement pour évaluer les périodes de retour des événements de référence centennaux (vagues/niveau d'eau) au rivage.

Étant donnée l'absence de longues séries de vagues et de niveaux d'eau à l'échelle de la Polynésie Française nécessaires à cette approche, une plate-forme de modélisation numérique a été mise en place par le BRGM :
- génération de plusieurs centaines de cyclones synthétiques représentatifs des cyclones historiques,
- génération des champs de vents et de pressions associés à ces cyclones,
- modélisation numérique des niveaux d'eau (surcote atmosphérique et marée) et des vagues cycloniques selon des grilles de calcul emboîtées dont les plus précises ont des mailles de 100 m,
- extraction le long des côtes des îles des séries de niveaux d'eau et des caractéristiques des vagues pour effectuer une analyse en probabilités conjointes.

Les améliorations de la méthode réalisées dans ARAI2 et 3 pourraient être appliquées en cas de révision des PPR submersion marine de certaines communes de la Polynésie Française.

2 Prise en compte de l'occupation du sol dans les modèle 2D

Les variations de l'occupation du sol ont un impact sur les écoulements. Il convient donc d'identifier les zones homogènes d'occupation (bâti, cultures, zones de végétation dense…) et d'adapter le modèle à cette occupation.

La présence de bâtiments peut présenter un effet significatif sur les écoulements. En effet, en zone densément urbanisée, les constructions peuvent représenter un obstacle à l'écoulement pouvant impacter les hauteurs de submersion ou influer sur les sens privilégiés des écoulements et sa vitesse. La contraction de l'écoulement entre les bâtiments peut par ailleurs engendrer une augmentation significative des vitesses d'écoulement.

La présence du bâti doit par conséquent être prise en compte. Pour la cartographie de l'aléa de référence et à échéance 100 ans, l'occupation du territoire en termes d'enjeux bâtis correspond à celle à la date de réalisation du PPRL. Plusieurs méthodes de prise en compte du bâti dans un modèle bi-dimensionnel ou vague à vague sont possibles -(cf. Illustration 62) :

- par modulation du coefficient de frottement,
- par application d'un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) intégrant le bâti au MNT, en modulant éventuellement la porosité des bâtiments pour prendre en compte le volume d'eau stocké dans les bâtiments.

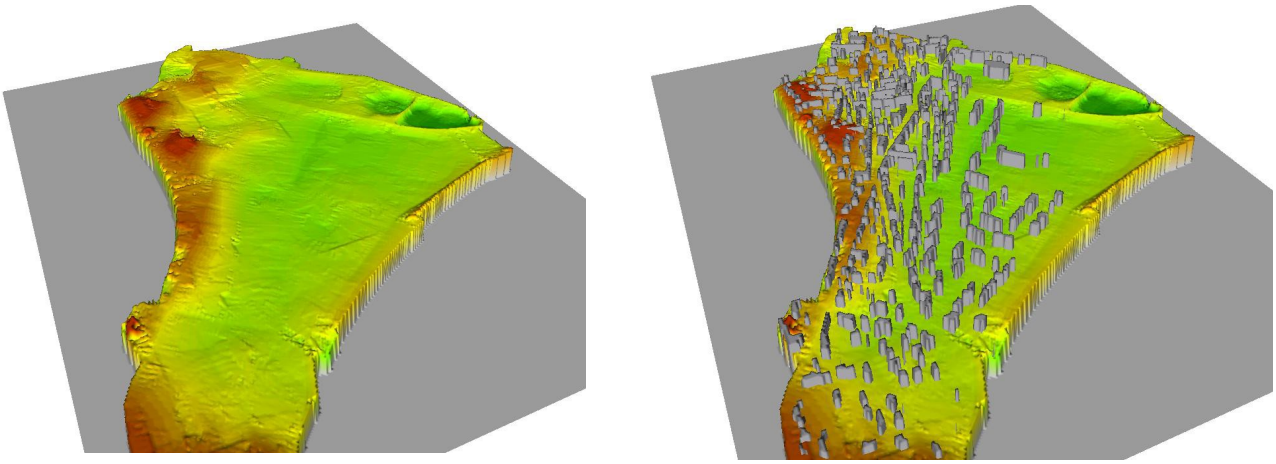


Illustration 62 : Topographie de Gâvres sans prise en compte et avec prise en compte des bâtiments (Source DHI, Peeters et al., 2009)

Les hypothèses de prise en compte du bâti doivent être systématiquement étudiées. Cependant la prise en compte du bâti par application d'un MNE n'a pas un caractère obligatoire. De manière générale, une simple modulation du coefficient de frottement sur les secteurs concernés peut être suffisante. Des tests de sensibilité pourront être proposés pour identifier l'impact de la prise en compte du bâti et identifier la méthode la plus appropriée. Il est à noter que l'exclusion ou la surélévation des bâtiments dans la topographie du modèle peut conduire à négliger le volume d'eau stocké dans ces bâtiments. Sur de grands espaces et en zone densément urbanisée, négliger ce stockage peut conduire à surestimer l'extension totale de l'inondation. Une porosité des bâtiments, plus proche de la réalité, peut ainsi être retenue. Dans des secteurs où la dynamique de l'inondation est lente, il est peu probable que les bâtiments présentent un effet significatif sur les hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement, et il peut donc être préférable de ne pas tenir compte de ces bâtiments afin de mieux reproduire les volumes d'eau stockés.

Le mode de prise en compte ou non des bâtiments dans le modèle doit donc être effectué au cas par cas, et peut éventuellement être différencié suivant les secteurs étudiés.

Illustration 63 : Comparaison des méthodes de prise en compte du bâti

A gauche, cartographie des vitesses d'écoulements dans une zone urbaine, en prenant uniquement en compte le paramètre de rugosité des sols – A droite, cartographie des vitesses d'écoulements dans une zone urbaine, en prenant en compte, en plus du paramètre de rugosité des sols, l'effet de blocage partiel du front bâti (les vitesses respectivement inférieures à 0,2 m/s, comprises entre 0,2 et 0,5 m/s et supérieures à 0,5 m/s sont représentées en vert, jaune et orange) (source Prolog Ingénierie)

Dans certains cas particuliers, plusieurs simulations peuvent être retenues pour la réalisation de la carte d'aléa : prise en compte du bâti par différentes méthodes donnant des résultats distincts sans qu'aucune hypothèse ne paraisse plus adaptée que l'autre. Dans ce cas, la carte d'aléa finale peut être réalisée à partir de différentes simulations en retenant en chaque point la situation la plus pénalisante.

2.4.4.d - Analyses menant à la caractérisation de l'aléa

1 Démarche générale

Les résultats obtenus par la méthode retenue (cf. supra) doivent ensuite être analysés et retravaillés avant d'obtenir les cartes d'aléa submersion marine. En effet, différentes étapes d'analyse conduisent à améliorer la connaissance de l'aléa submersion marine. Ainsi, les analyses des hypothèses prises au regard du fonctionnement du site, de la précision des données et des outils utilisés et de la précision des résultats obtenus sont utiles pour déterminer les points d'attention particuliers. **Les analyses suivantes sont nécessaires à la réalisation de la carte d'aléa de submersion marine** :

- la détermination des zones d'écoulement des eaux (et non uniquement de stockage final des volumes) ;
- l'identification des zones soumises à l'action des vagues et aux franchissements par paquets de mer ;
- l'analyse des possibles bascules du plan d'eau liées au vent sur des zones inondées fermées ou semi-fermées. Une analyse spécifique des zones arrière-littorales en eau (étangs, lagunes, courants côtiers…) est nécessaire (cf. Encart 21) ;
- l'analyse de l'impact du clapot généré sur les zones submergées ;
- de manière spécifique, lorsque la méthode de superposition du niveau marin à la topographie a été retenue, la vérification de l'inondabilité effective des différentes zones topographiquement basses cartographiées. Il s'agit ainsi de bien vérifier que chaque zone cartographiée est en lien avec la mer, soit directement par des points d'entrée d'eau identifiés et visibles, soit indirectement (cas d'une dépression enclavée du fait d'obstacles à l'écoulement mais où des entrées d'eau sont possibles du fait d'une érosion possible de la zone littorale, de franchissements par paquet de mer, d'entrée d'eau par un exutoire, de remontée de nappe…) ;
- l'analyse des résultats au regard des cartes anciennes, de la géologie et des événements historiques.

Une phase d'analyse à dires d'expert porte sur la qualification des critères de dynamique de submersion, notamment la vitesse d'écoulement, la vitesse de montée des eaux ou la durée de submersion. L'analyse du fonctionnement du site et les événements historiques sont les principales sources d'informations permettant cette qualification qui peut s'appuyer sur les résultats des outils numériques. L'estimation des critères de submersion est cependant soumise à de fortes incertitudes, d'où l'importance de les qualifier. Les vitesses d'écoulement, qui peuvent être quantifiées par un modèle bi-dimensionnel, sont ainsi très sensibles à des paramètres comme le frottement, la taille des mailles de calcul ou la prise en compte des obstacles à l'écoulement (ouvrages, bâti, clôtures…) et restent soumises à de fortes incertitudes. Les résultats de l'analyse permettent donc principalement de déterminer les secteurs de plus forts écoulements. Les zones de fortes vitesses de montée des eaux sont également à identifier. Cette analyse permettra également d'identifier les zones d'aléa très fort, liées à de très fortes hauteurs d'eau ou à de très fortes vitesses d'écoulement ou de montée des eaux.

Pour rendre compte des phénomènes identifiés par l'analyse ci-dessus et non pris en compte par les méthodes décrites précédemment aboutissant à une première cartographie, les zones soumises à aléa peuvent ainsi être modifiées à dires d'expert.

La précision des MNT, de plus en plus élevée, et les outils numériques permettent l'obtention des caractéristiques de l'aléa à une forte résolution. Un deuxième type d'analyse est donc parfois à conduire afin d'obtenir une carte d'aléa présentant des zones aux caractéristiques d'aléa homogènes, exploitable dans le cadre de l'élaboration du PPRL.

Il convient cependant de conserver la traçabilité des modifications effectuées et leur justification. Cette analyse doit veiller ainsi à la représentation de l'aléa submersion marine non perturbé par les nombreuses hypothèses retenues et ainsi à une représentation lissée des résultats ayant pu être obtenus en première approche.

Les fortes vitesses d'écoulement, de même que les franchissements par paquets de mer, associées à des fortes dissipations d'énergie, induisent des chocs mécaniques pouvant être extrêmement violents et sont considérés comme un aléa à part entière. Sont ainsi à identifier les zones soumises aux chocs de vagues et à l'arri-

vée brutale d'une onde de submersion, générée par surverse ou rupture d'ouvrage en arrière immédiat des ouvrages de protection contre les submersions ou au-delà de celles-ci dans les zones d'écoulement préférentiel (cf. paragraphes ci-dessous).

2 Secteurs soumis aux chocs de vagues et aux projections

La zone soumise aux franchissements est sujette à des contraintes spécifiques, en particulier à des chocs mécaniques de vagues et des projections. L'aléa choc mécanique des vagues est donc distinct de l'aléa inondation. Lorsque des zones de franchissements importants sont identifiées, une analyse spécifique de la topographie en arrière et des efforts et pressions d'impact des franchissements de vagues peut être menée afin de déterminer la largeur de la zone concernée. Dans les zones caractérisées par des franchissements modérés, la largeur de la zone soumise au déferlement peut être considérée par défaut comme égale à 25 m, et étendue à 50 m dans un contexte cyclonique.

Illustration 64 : Submersion marine à St-Pierre (Martinique) lors du passage du cyclone Omar le 16/10/2008 : déferlement des vagues sur les habitations et franchissement (Photo : A.V. Barras, BRGM).

Cette bande ne prend pas en compte les éventuelles projections de matériaux (sables, galets, etc.). Les secteurs soumis aux projections, autre aléa lié à la submersion marine, doivent être par conséquent identifiés.

3 Bande de précaution relative aux structures jouant un rôle de protection

Derrière les structures jouant un rôle de protection, faisant de fait obstacle à l'écoulement, des aléas particuliers doivent être pris en compte. En effet, la zone située à l'arrière d'un ouvrage subit de fortes vitesses d'écoulement lors des surverses. Par ailleurs, en cas de rupture, des vitesses d'écoulement encore plus fortes sont susceptibles de se produire. Une bande de précaution est donc appliquée derrière ces ouvrages. Elle permet de rendre compte des fortes dynamiques de submersion quel que soit le (ou les) point(s) de surverse ou de rupture. Elle est déterminée :

- soit de manière forfaitaire (cf. ci-dessous),
- soit sur la base d'éléments techniques fournis par le gestionnaire de l'ouvrage,
- soit sur la base d'une étude de sensibilité réalisée à partir de modélisations, lorsque le fonctionnement hydraulique est complexe, en particulier lorsque la topographie à l'arrière de l'ouvrage est très variable. Cette étude, lourde en termes de nombre de simulations, peut conduire à augmenter ou réduire la largeur de la bande de sécurité obtenue par méthode forfaitaire.

La largeur de la bande de précaution ne peut être inférieure à 50 mètres.

La largeur forfaitaire est définie par l'application d'une distance de 100 fois la hauteur h comprise entre le niveau marin de référence du PPRL et la cote du terrain naturel immédiatement derrière l'ouvrage (cf. Encart 29), sauf dans le cas où elle se prolongerait à des cotes au-dessus du niveau marin de référence (cf. Illustration 65). Ainsi, L = 100 x h. La hauteur considérée est au maximum la hauteur comprise entre la cote de crête de l'ou-

vrage et la cote du terrain naturel immédiatement derrière l'ouvrage, lorsque le niveau marin de référence est supérieur à la crête de l'ouvrage. Quel que soi l'ouvrage, la bande de précaution débute au pied de l'ouvrage côté terre et ne débute jamais sur la partie exposée aux aléas.

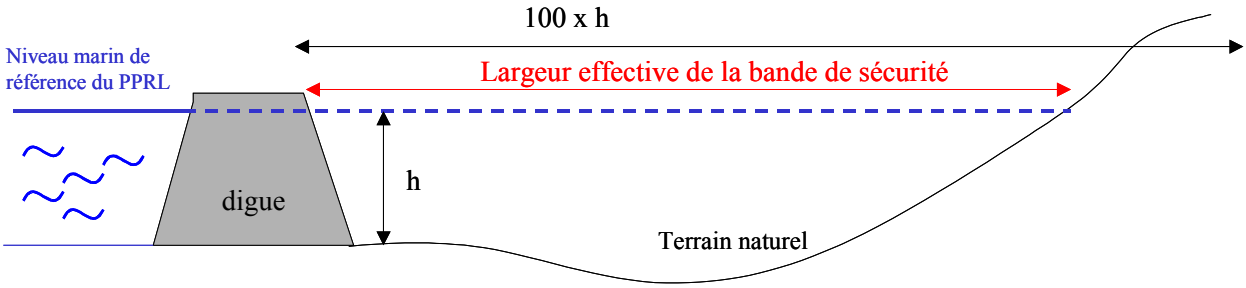


Illustration 65 : Définition de la bande de sécurité derrière un ouvrage

Cette bande de précaution est également être appliquée derrière les ouvrages de second rang, les remblais et les cordons naturels si des défaillances sont envisagées. Les mêmes modalités de définition de cette bande peuvent alors être retenues.

Encart 29 : Bande de précaution relative aux ouvrages de protection de largeur 100 fois la hauteur de l'ouvrage : Enseignements des brèches sur les levées de la Loire

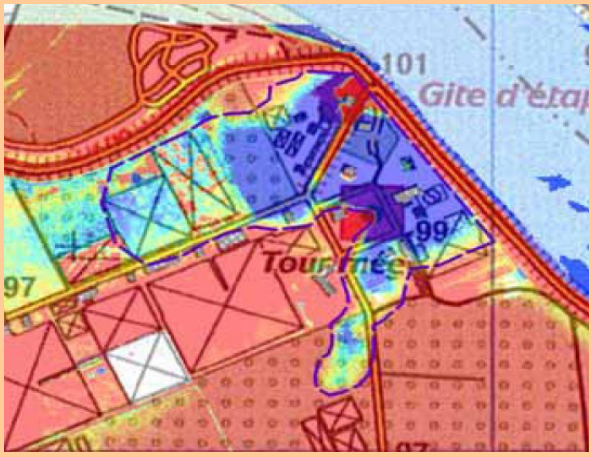
Le Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) du bassin Loire-Bretagne 2010-2015 (2009) aborde le risque de rupture des ouvrages de protection contre les inondations. Il propose, à défaut de disponibilité des études de danger des ouvrages, d'instaurer une bande de largeur de 100 m par mètre de hauteur de digue où toute construction nouvelle est interdite.

Cette méthode de détermination de la largeur de cette bande a été vérifiée par l'analyse de 107 brèches anciennes de la Loire (Descamps et Maurin, 2008). Cette méthodologie repose sur une analyse des fosses d'érosion historiques générées par les fortes vitesses d'écoulement dues aux brèches, indiquant les zones de danger liées aux fortes dissipations d'énergie. Elle combine des analyses géographique, morphologique, historique et topographique. Une analyse hydro-morphologique de la fosse d'érosion est réalisée à l'aide de Modèles Numériques de Terrain (MNT). Les cartes IGN permettent par ailleurs d'identifier si un plan d'eau, une zone de végétation ou des courbes niveaux anormales sont présentes (cf. Illustration 66). Ces informations sont recoupées avec les informations disponibles sur les brèches historiques. Les photos aériennes permettent ensuite de vérifier la trace visible.

L'analyse de ces formes d'érosion, et plus particulièrement de leur éloignement par rapport à l'ouvrage, mise en lien avec les hauteurs de digue côté val, ont permis d'estimer la largeur de la zone de danger à l'arrière de la digue à 100 fois sa hauteur.

Illustration 66 : Identification de la brèche du val de Gien de 1856 sur a) photographie aérienne de 2005 (IGN) b) scan 25 (carte IGN)c) scan 25 (carte IGN) et MNT lidar de 2002 (Source : Descamps, 2008)

Le château de l'Isle constitue un exemple intéressant pour définir la zone de dissipation de l'énergie à l'arrière d'une digue en cas de brèche. En septembre 1866, une brèche s'est ouverte en face du château de construction massive. La distance entre la levée et le château est de 150 mètres. La dénivellation entre le sommet de la digue et son terrain d'assise est de 2,10 mètres (levée : 100,50 m NGF, terrain de fondation du château : 98,40 m NGF). Dans ce cas, la valeur de d/h = 71, alors que le bâtiment a une solidité bien plus grande que les constructions modernes et que la fosse d'érosion s'est propagée de chaque coté de l'obstacle qu'il constituait, comme on le voit dans la carte de la topographie réalisée au moyen du MNT laser (cf. Illustration 67).



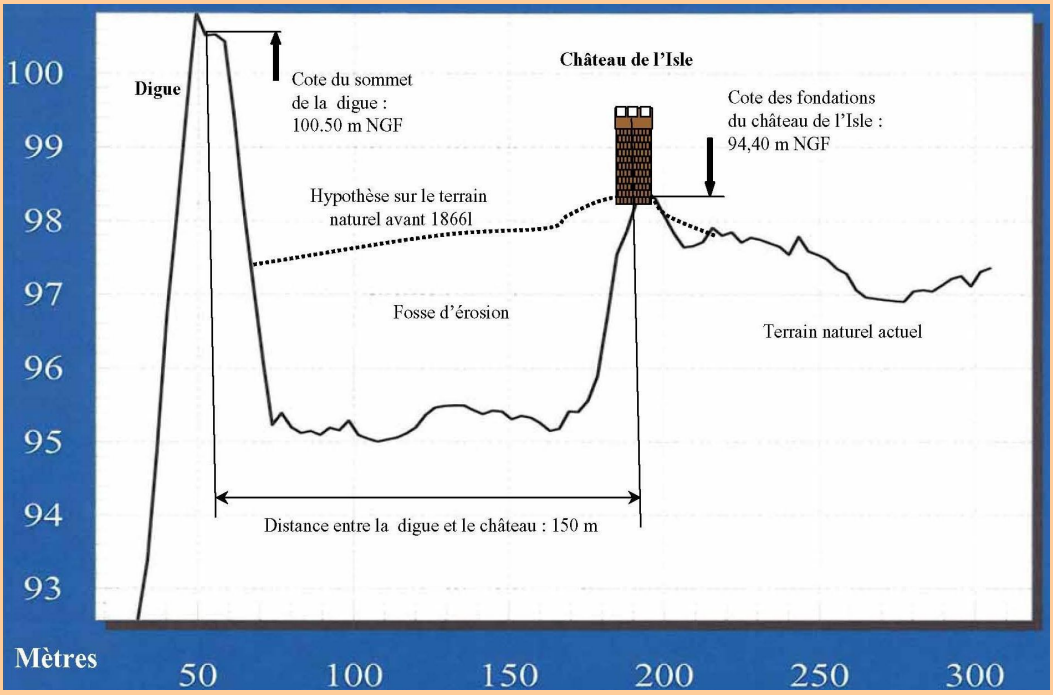


Illustration 67 : Analyse de la brèche du château de l'Isle a) MNT - Scan 25 ® IGN© b) profil en travers de la topographie entre la levée et le château de l'Isle

Cette analyse, menée dans un domaine fluvial, est directement transposable en domaine maritime. En effet, la zone de danger ainsi estimée est directement liée à la hauteur de charge hydraulique s'appliquant sur l'ouvrage, hauteur étant liée au niveau d'eau, c'est-à-dire au niveau marin au droit de l'ouvrage.

2.4.5 - Qualification de l'aléa

2.4.5.a - Échelle de qualification

Comme pour tout aléa inondation, il existe dans le cadre de la submersion marine une gradation dans la manifestation des phénomènes. Cette gradation doit se traduire par un mode de qualification adéquat afin d'être confrontée à la connaissance des enjeux. Le mode de qualification retenu ici reprend les principes mis en œuvre habituellement dans les PPR inondation. Notamment, la limite entre l'aléa modéré et l'aléa fort dépend de la capacité à se mouvoir, d'un adulte en bonne santé, lui permettant ainsi d'échapper sans assistance au phénomène en cours.

Le PPRL comporte a minima deux catégories d'aléa, modéré et fort. Il peut, le cas échéant, comporter des catégories supplémentaires selon les contextes locaux (faible et/ou très fort).

2.4.5.b - Mode de qualification

La qualification de l'aléa, c'est-à-dire la détermination du niveau d'aléa, dépend des paramètres suivants :

- **de la hauteur d'eau produite par la submersion**

Les hauteurs d'eau sont systématiquement quantifiées pour l'aléa de référence. Les seuils de hauteur d'eau sont définis par un pas de 50 cm (soit <0,5m ; 0,5<h<1m ; h>1m ; h>1,50m…) de la même manière que pour l'inondation par débordement de cours d'eau.

- **de la dynamique de submersion liée à la rapidité du phénomène (vitesse de montée des eaux), à la durée de submersion et à la vitesse d'écoulement de l'eau**

La dynamique de submersion est qualifiée à partir du paramètre le plus défavorable entre la vitesse d'écoulement des eaux et la vitesse de montée des eaux. La dynamique de submersion est qualifiée suivant deux à trois classes, à dires d'expert sur la base des éléments à disposition. Les critères suivants, rendant compte du fonctionnement hydraulique du site, peuvent être utiles à la qualification de la dynamique de submersion :

- présence d'ouvrages de protection, structures naturelles de protection et autres obstacles à l'écoulement (bande de dynamique forte à l'arrière en cas de rupture),
- particularités topographiques (sens de circulation préférentiel des écoulements, points d'entrée d'eau),
- analyse des événements historiques (vitesses d'écoulement importantes, sens de circulation préférentiel des écoulements, points d'entrée d'eau).

Les seuils suivants sont utilisés pour la vitesse d'écoulement (cf. Illustration 68) :

- V > 0,75 m/s vitesse d'écoulement rapide,
- 0,25 < V < 0,75 m/s vitesse d'écoulement moyenne,
- 0 < V < 0,25 m/s vitesse d'écoulement lente.

Cependant, les incertitudes relatives aux évaluations des vitesses d'écoulement sont souvent très importantes. Dans certains cas, il est difficile de qualifier la vitesse de ce fait et celle-ci ne peut être prise en compte dans l'analyse de la dynamique de submersion.

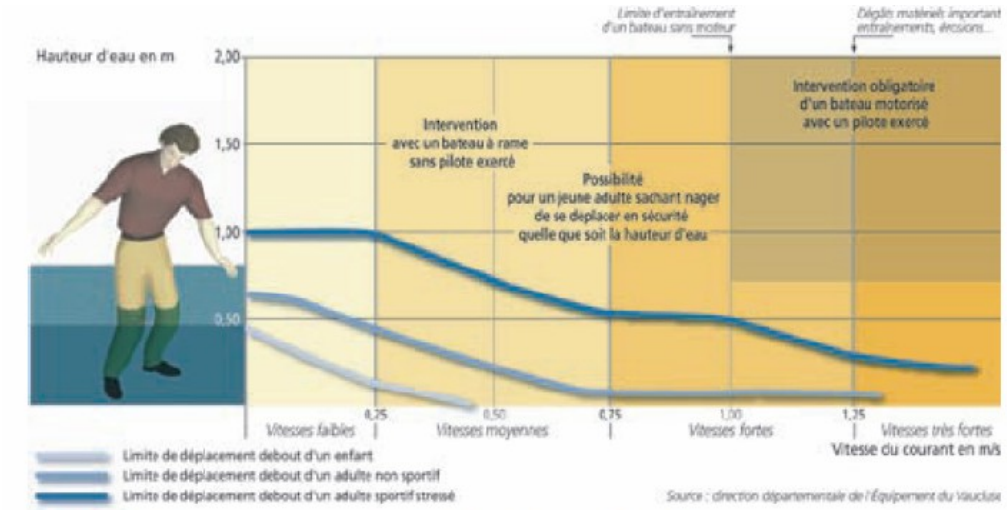


Illustration 68 : Possibilités de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement (source: guide PPR inondations, note complémentaire sur le ruissellement péri-urbain)

La vitesse de montée des eaux ou la durée de submersion peuvent, lorsqu'elles sont défavorables, venir majorer le niveau de dynamique de submersion. La vitesse de montée des eaux a un impact principalement lorsque les hauteurs d'eau maximales atteintes ne sont pas faibles. Ce critère peut donc ne pas être considéré pour des hauteurs d'eau inférieures à 0,5 m.

Lorsque des modélisations numériques sont réalisées et que l'aléa est variable dans le temps, la cartographie de l'aléa de référence résulte de la prise en compte en tout point du territoire de l'aléa le plus pénalisant (hauteur ou couple hauteur/dynamique de submersion).

L'aléa submersion marine peut ainsi être caractérisé selon l'un des deux tableaux suivants en fonction des éléments disponibles :

		Dynamique de submersion		
		Lente	Moyenne	Rapide
Hauteur d'eau (m)	H<0,5	Faible	Modéré	Fort
	0,5<h<1	Modéré	Modéré	Fort
	H>1	Fort	Fort	Très fort

Dynamique de submersion	
Lente	Rapide

Hauteur d'eau (m)	H<0,5	Faible	Fort
	0,5<h<1	Modéré	Fort
	H>1	Fort	Très fort

2.4.5.c - Niveau d'aléa très fort

Du fait de la force des phénomènes littoraux, un aléa « très fort » a été introduit. **Cette qualification est réservée aux phénomènes susceptibles de produire des dégâts majeurs et immédiats sur les enjeux rencontrés.**

L'analyse de l'aléa (cf. analyses menant à la caractérisation de l'aléa 2.4.4) peut donc conduire à retenir certaines zones en aléa très fort en complément des catégories prévues par le tableau précédent. Il s'agit :

- de zones présentant des hauteurs d'eau très importantes,
- de zones d'écoulement préférentiel,
- des zones liées aux bandes de précaution à l'arrière d'une digue, dont la rupture peut engendrer un flot pouvant détruire très rapidement les habitations exposées.
- de zones en « cuvette » où les vitesses de montée des eaux peuvent être très rapides et les niveaux d'eau importants peuvent mettre en danger la vie des personnes.

2.4.5.d - Autres aléas liés à la submersion marine

Cette analyse peut également conduire à identifier des zones soumises à des aléas distincts de l'aléa submersion marine mais néanmoins directement liés à cet aléa. Il s'agit :

- des zones soumises à des chocs mécaniques de vagues, en aléa fort à très fort ;
- des zones soumises à des projections, en aléa modéré à très fort.

2.4.6 - Résultats attendus

Les résultats obtenus par les différentes investigations réalisées sont consignés dans un rapport d'étude interne, récapitulant :

- la liste des données et informations mobilisées,
- les méthodologies employées et la justification des hypothèses,
- les analyses menées,
- les résultats.

Enfin, un cahier des cartes de synthèse (en général : 1/25 000e agrandi au 1/10 000e sauf cas particuliers nécessitant des cartes plus précises) peut être établi. Plusieurs types de carte y sont intégrés :

- **une carte de synthèse des modes de submersion et écoulements** : linéaire soumis aux franchissements, linéaire soumis aux débordements, points d'entrée,
- **une carte de synthèse identifiant les ouvrages de protection, les cordons naturels et les remblais jouant un rôle contre la submersion marine et présentant leurs hypothèses de défaillance,**
- **une carte informative basée sur la méthode de superposition topographie/niveau marin de référence** (si méthode employée pour les cartes suivantes différente de celle-ci) : carte des secteurs de dynamique forte, carte des hauteurs d'eau,

- **une carte d'aléa basée sur l'événement de référence (sans prise en compte de l'effet des ouvrages) :** carte des secteurs de dynamique forte, carte des hauteurs d'eau,
- **une carte de l'aléa de référence (avec prise en compte de l'effet des ouvrages actuels)**, carte des secteurs de dynamique forte, carte des hauteurs d'eau,
- **une carte de l'aléa à échéance 100 ans (avec prise en compte de l'effet des ouvrages actuels)**, carte des secteurs de dynamique forte, carte des hauteurs d'eau,
- en tant que de besoin, **les cartes d'aléas chocs de vagues et projections de matériaux**.

Et éventuellement, à titre d'information (hors champ du PPR) :

- une carte d'aléa basé sur un événement fréquent,
- une carte de l'aléa extrême, basé sur un événement rare.

3 - Méthode d'analyse des enjeux

3.1 - Objectifs de l'analyse des enjeux

La connaissance des enjeux dans la zone d'étude du PPRL est un préalable à l'établissement de la cartographie des risques. En référence au guide général PPRN et à l'article L.566-1 du code de l'environnement transposant la directive inondation, la notion d'enjeux est associée aux conséquences des inondations sur la santé humaine, l'environnement, les biens, dont le patrimoine culturel, et l'activité économique. Cette notion s'apprécie aussi bien pour le présent que pour les projets futurs.

L'identification et la caractérisation des enjeux soumis aux aléas littoraux sont une étape indispensable de la démarche d'élaboration du plan de prévention des risques. Ce diagnostic territorial est nécessaire pour assurer la transcription des objectifs de prévention des risques en dispositions réglementaires. Il sert d'interface avec la carte des aléas pour délimiter le plan de zonage réglementaire, préciser le contenu du règlement, et prescrire des mesures de prévention, de protection et de sauvegarde ainsi que des mesures sur les biens et activités existants.

L'analyse et la cartographie des enjeux s'appuieront autant que possible sur les systèmes d'information géographiques (SIG). Les SIG facilitent le recueil des données, leur traitement, leur représentation, leur mise à jour ainsi que la superposition des enjeux et des aléas.

Les enjeux sont cartographiés à l'échelle du 1/10 000, voire du 1/5 000 pour les zones denses nécessitant une approche plus précise telles que les zones urbaines, les ports, les zones protégées par des ouvrages, le front de mer…. La précision des cartographies doit être adaptée aux territoires et à la nature des phénomènes générateurs de risques pour assurer une bonne lisibilité des cartes produites.

A minima, et en application de la circulaire du 27 juillet 2011 relative à la prise en compte du risque submersion marine dans les PPRL, la carte des enjeux fait apparaître les zones non urbanisées, les espaces urbanisés, le ou les centres urbains. Pour assurer une meilleure compréhension du dossier lors des différentes phases de consultation, cette carte peut être intégrée dans la note de présentation du PPRL ou en annexe de celle-ci.

3.2 - Périmètre et démarche d'étude

L'étude des enjeux fait appel en priorité aux données existantes, qu'elles soient disponibles au sein des services de l'État ou présentes dans les services des collectivités locales. Ces données seront complétées et vérifiées sur le terrain. Cette phase peut être engagée dès que l'analyse du fonctionnement du littoral a défini la courbe-enveloppe à l'intérieur de laquelle les aléas vont être précisés.

Le périmètre d'étude des enjeux couvre au minimum celui défini par l'arrêté de prescription. Il comprend les zones exposées aux risques ainsi que les zones non directement exposées aux risques mais où des aménagements pourraient aggraver les risques ou en provoquer de nouveaux.

Les cartographies thématiques qui pourraient être produites en fonction de la complexité du territoire sont agrégées dans une carte de synthèse des enjeux, accompagnée d'une note explicative synthétique qui peut constituer une part importante du rapport de présentation.

3.3 - Enjeux généraux

La notion d'enjeux recouvre l'ensemble des personnes, des biens et des activités susceptibles d'être affectées ou endommagées par les aléas considérés au titre du PPRL.

L'analyse des enjeux inclut la compréhension du fonctionnement du territoire ainsi que des différentes problématiques à prendre à compte. Cette analyse sera adaptée au contexte local, à la complexité du territoire, aux moyens disponibles et aux objectifs poursuivis.

Les enjeux à considérer pour l'élaboration du projet de PPRL peuvent être regroupés en trois catégories distinctes : les enjeux incontournables, les enjeux complémentaires et les autres éléments de contexte.

3.3.1 - Les enjeux incontournables

L'analyse des enjeux incontournables a pour objectif de comprendre l'organisation et le fonctionnement du territoire :

- Quels sont les différents pôles structurants?
- Quels sont les espaces naturels participant à la prévention des risques à préserver?

Cette analyse consiste à caractériser les différents types d'occupation du sol suivant des ensembles homogènes englobant des éléments topographiques de même nature.

Les enjeux incontournables sont les suivants :

- **Les espaces urbanisés**
  Ces espaces sont définis par référence aux dispositions de l'article L.111-1-4 du code de l'urbanisme, dont les modalités d'application sont fixées par la circulaire n°96-32 du 13 mai 1996 de la direction de l'aménagement et de l'urbanisme.
  Le caractère urbanisé ou non d'un espace s'apprécie en fonction de la réalité physique (nombre de constructions existantes, distance du terrain en cause par rapport à ce bâti existant, contiguïté avec des parcelles bâties, niveau de desserte par les équipements) et non d'un zonage opéré par un plan local d'urbanisme. A titre d'exemple, une zone AU non bâtie ne peut être considérée comme une zone urbanisée. De même, une zone peu urbanisée ou « mitée » ne constitue pas systématiquement un espace urbanisé.

- **Le centre urbain**
  La circulaire interministérielle du 24 avril 1996 relative aux dispositions applicables aux bâtis et ouvrages existants en zones inondables explicite la notion de centre urbain. Celui-ci se caractérise par son histoire, une occupation du sol de fait importante, une densité, une continuité bâtie et la mixité des usages entre logements, commerces et services. Le centre urbain peut donner lieu à un zonage et une réglementation adaptée à ses spécificités (urbanisation des dents creuses par exemple).

- **Les espaces spécifiques au type d'aléa étudié**
  Ces espaces sont le support d'activités spécifiques et particulièrement vulnérables aux aléas étudiés. Dans le cadre d'un PPRL, certaines activités spécifiques peuvent faire l'objet de prescriptions particulières. Il convient donc de les identifier en amont. Il peut être utile d'identifier notamment :
  - **Les ports, zones d'activités portuaires et d'activités balnéaires**

- **Les campings et l'hôtellerie de plein air**
  L'aléa submersion marine et l'aléa érosion ont pour caractéristiques d'être des aléas diffus sur le littoral et pour lesquels la prévision est assez complexe. Il est donc difficile de définir précisément la zone du littoral concernée. De fait celle-ci peut correspondre à plusieurs centaines de kilomètres de côtes.
  Largement présents sur le littoral, les campings représentent un enjeu particulier pour le PPRL. Parfois situés à proximité immédiate de la côte, ils peuvent être très fortement exposés aux aléas marins. Ils sont par ailleurs de plus en plus prisés en tant qu'hébergement touristique et peuvent accueillir des centaines des personnes, très souvent peu familières des problématiques de risques littoraux. Enfin, leur localisation historiquement isolée, les rend bien souvent peu accessibles. L'ensemble de ces facteurs leur confèrent une vulnérabilité importante.

- **Les activités agricoles spécifiques**
  Les élevages sur prés salés et les marais salants représentent des activités spécifiques de bord de mer qu'il convient de prendre en compte lors de l'élaboration d'un PPRL. Ils peuvent également alimenter la réflexion lors de l'élaboration d'un plan communal de sauvegarde en identifiant notamment les chemins d'accès.

- **Les espaces participants à la propagation des aléas**
  Certains espaces naturels, agricoles ou forestiers peuvent jouer un rôle dans la dynamique des phénomènes ce qui justifie une identification particulière. Des prescriptions spécifiques et adaptées pourront alors être prescrites sur ces espaces.

3.3.2 - Les enjeux complémentaires

Les enjeux complémentaires étudiés fournissent une connaissance approfondie du territoire et permettent une analyse plus poussée de sa vulnérabilité. L'échelle de travail est plus fine que la précédente, les enjeux sont principalement ponctuels ou linéaires. Ils permettent d'identifier des points particulièrement vulnérables au sein des espaces précédemment définis, et de comprendre les relations et les liaisons fonctionnelles entre ces espaces. L'analyse conduit à considérer :

- **l'élaboration du projet de PPR nécessite de connaître les projets d'aménagement futurs du territoire**. Ces projets peuvent en effet participer à la production de l'aléa ou nécessiter des prescriptions particulières. En outre, il est important d'appréhender les espaces aménageables, dès lors qu'ils ne sont pas exposés à l'aléa, et qu'ils peuvent de ce fait offrir des alternatives intéressantes à l'urbanisation des sites exposés. Il peut être utile de disposer d'éléments sur les potentialités offertes par ces zones pour établir le dialogue dans le cadre de l'association. On peut estimer que la durée de vie d'un PPRL est aux alentours de 10 ans entre le temps de l'approbation du premier PPRL et sa mise en révision. Les projets futurs s'inscrivent dans cette échéance de moyen terme. La plupart du temps, les projets structurants pour les territoires concernés sont identifiés par les collectivités voire les réflexions déjà engagées.

- **les infrastructures et équipements particuliers** :
  - les établissements sensibles ou difficilement évacuables. Par exemple : crèches, écoles, hôpitaux, maisons de retraite, centres pénitentiaires...

- les équipements collectifs de type ERP ou les espaces publics ouverts. Ces équipements ou espaces accueillent périodiquement un nombre important de personnes dont les conditions d'évacuation ou de mise en sécurité doivent être étudiées,

- les infrastructures de transport. Elles sont essentielles pour assurer l'accès des secours mais également l'évacuation des personnes. Elles peuvent également accélérer le transit des masses d'eau ou créer des obstacles aux écoulements.

- **les enjeux patrimoniaux, culturels et environnementaux** pour lesquels des mesures de prévention, de protection ou de sauvegarde peuvent être prescrites. A cet égard, certains espaces naturels peuvent jouer un rôle et limiter l'effet de l'aléa (dune, étang, marais, …). Leur identification pourra être pertinente dans une perspective de prescriptions particulières relatives à l'usage et/ou l'entretien de ces espaces (par exemple : prescriptions de mesures en faveur de la conservation de la dune : limitation du piétinement par création de cheminement)..

- **la typologie du bâti**. Cette typologie permet une approche de la vulnérabilité ouvrant sur des prescriptions spécifiques et adaptées.

3.3.3 - Les autres éléments de contexte

Pour la cartographie de l'aléa, à échéance 100 ans, l'occupation du territoire (en termes d'enjeux et de systèmes de protections) correspond à celle à la date de réalisation du PPRL. Seule la représentation de l'aléa varie dans le temps, l'augmentation de la vulnérabilité du territoire étant limité par le PPRL actuel tant par ses mesures prescriptives sur l'existant que par la réglementation des constructions nouvelles.

La complexité du territoire, la nécessité de relier les différents volets de l'action publique de gestion du risque et l'importance à accorder au dialogue avec les acteurs locaux, font que la connaissance des enjeux précités peut s'avérer dans certains cas insuffisante.
L'étude d'autres éléments, dits de contexte, permet d'approfondir la connaissance du fonctionnement et des évolutions du territoire. Les éléments de contexte à étudier peuvent alors être :

- les enjeux stratégiques pour la gestion de crise : PC crise, centre de secours, ERP pouvant servir d'hébergement, centraux téléphoniques, centrales électriques,

- la vulnérabilité des différents réseaux et les effets de leurs dysfonctionnements,

- les procédures réglementaires existantes ou à venir,

- les mises en perspective : évolution démographique, contexte socio-économique, place du territoire considéré au sein d'ensembles territoriaux plus vastes,

- l'évaluation quantitative des populations menacées, au vu de ces mises en perspectives.

4 - Élaboration du dossier de PPRL

Le contenu du dossier de PPRL est défini par l'article R.562-3 du Code de l'environnement. Il comprend :

- une note de présentation,
- un ou plusieurs documents graphiques,
- un règlement.

En complément de cette partie, il est conseillé de se référer au guide général PPRN dans lequel l'élaboration du dossier de PPRN est explicitée de manière exhaustive.

4.1 - La note de présentation et ses annexes

La note de présentation est un élément essentiel du dossier, elle a pour fonction d'expliquer et de justifier la démarche PPRL et son contenu. Elle doit être suffisamment claire, étayée et pédagogique afin d'assurer une bonne compréhension du projet. Elle traite les thématiques suivantes :

- les stratégies nationales en matière de prévention des risques d'inondation et de submersion marine, de gestion du trait de côte, le plan de gestion des risques d'inondation,
- le contexte territorial dans ses dimensions physiques, humaines, socio-économiques et environnementales,
- le fonctionnement du littoral, la nature des phénomènes pris en compte et leurs conséquences possibles,
- les principaux événements passés et les dommages occasionnés aux personnes et aux biens,
- la justification du PPRL et ses périmètres d'études et de réglementation, en s'appuyant sur le bassin de risques submersion et érosion,
- les enjeux locaux,
- les modalités de l'association et de la concertation,
- les études techniques de caractérisation des aléas, d'analyse des enjeux et les investigations particulières ayant pu être conduites, en définissant notamment les phénomènes considérés, la méthodologie utilisée pour la caractérisation des aléas ainsi que les incertitudes inhérentes aux méthodes retenues,
- les orientations stratégiques prises en application des principes fondamentaux de la prévention des risques et des conclusions des phases de discussions avec les acteurs locaux. Le caractère inondable d'une zone protégée par un ouvrage sera opportunément rappelé.
- le projet de PPR énonçant les pièces constitutives du dossier, présentant et justifiant zone par zone, le zonage réglementaire et le règlement associé. Une attention particulière est à apporter quant à la justification des zonages et des mesures qui s'y appliquent. Les règles applicables aux projets nouveaux et aux biens et activités existants, les principes attachés aux mesures de prévention, de protection et de sauvegarde seront également explicités.

En préambule de ces développements, il est indispensable de rappeler les éléments de terminologie les plus couramment employés tels que aléas, enjeux, vulnérabilité…

Certaines cartes de nature informative, relatives aux aléas et aux enjeux, seront jointes à la note de présentation dès lors qu'elles facilitent un partage de la connaissance des phénomènes et la compréhension des orientations prises. Ces documents doivent être pédagogiques et commentés. Un rappel des principaux textes applicables aux PPRN et autres documents de référence pourra utilement être joint en annexe de la note de présentation.

4.2 - Le zonage réglementaire

Le zonage réglementaire traduit de façon cartographique les choix issus de l'évaluation des risques et de la concertation menée avec l'ensemble des acteurs de la gestion du risque. Ce zonage doit être lisible et compréhensible par tous. Il a pour but de définir, dans les zones directement exposées aux risques et le cas échéant, dans les zones non directement exposées, une réglementation homogène comprenant des interdictions et des prescriptions réglementaires.

L'élaboration de la carte de zonage réglementaire s'appuie, dans un premier temps, sur une superposition des aléas et des enjeux puis dans un second temps, sur l'application des principes généraux d'élaboration du PPRN détaillée ci après (cf. guide général relatif à l'élaboration des PPRN).

Le nombre de zones doit correspondre au nombre de combinaisons des aléas et des enjeux. Il n'existe cependant pas de contrainte réglementaire quant au nombre de zones pouvant être identifiées. Une zone particulière pourra être délimitée chaque fois que la spécificité d'un risque et ses caractéristiques le justifient. En revanche, le règlement associé peut rassembler les dispositions de plusieurs zones, si celles-ci sont identiques pour des raisons analogues ou pour des objectifs différents. La clarté, la lisibilité et la compréhension des prescriptions réglementaires devant être appliquées devront particulièrement être recherchées par les services à cette occasion.

L'élaboration du zonage réglementaire d'un PPRL est un exercice délicat car il nécessite de prendre en considération sur un même espace :

- plusieurs aléas spécifiques au littoral : recul du trait de côte, submersion marine, migration dunaire, choc de vagues,
- des niveaux d'aléa suivant différentes temporalités : aléa de référence et aléa à échéance 100 ans,
- des bandes de précaution derrière les ouvrages de protection.

La distinction des différentes zones se fait principalement sur les critères de constructibilité pour les projets futurs. Les mesures sur les biens et activités existants, sur les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde peuvent être définies pour l'ensemble des zones ou pour chacune des zones.

La prise en compte des deux temporalités d'aléas : l'aléa de référence ainsi que l'aléa à échéance 100 ans, a été traduite par une progressivité de la réglementation entre les deux niveaux, conditionnée par le caractère urbanisé ou non de la zone considérée. Ainsi il sera appliqué les principes suivants :

- zone non urbanisée : elle est inconstructible sur la base de l'aléa de référence. Dans quelques rares cas, l'inconstructibilité sur la base de l'aléa à échéance 100 ans sera appliquée (cf. tableau infra). Ce cas concerne notamment les zones en cuvette, non inondables actuellement mais qui, par effet de " remplissage ", pourraient être exposées à des hauteurs d'eau et/ou des vitesses de courant importantes ;
- zone déjà urbanisée : le caractère inconstructible sera décidé sur la base de l'aléa de référence. Aucune zone déjà urbanisée ne sera rendue inconstructible sur la base de l'aléa à échéance 100 ans. Cependant dans ces zones, le périmètre et la nature des mesures de réduction de vulnérabilité à prescrire seront, la plupart du temps, définis à partir de l'aléa à échéance 100 ans. Il est en effet moins coûteux, par exemple, de construire une maison adaptée à l'aléa potentiel futur que d'adapter a posteriori une construction existante.

Ainsi le zonage réglementaire réalisé repose essentiellement sur la base de l'aléa actuel. Bien que les connaissances de l'aléa à échéance 100 ans, incluant une surélévation du niveau de la mer liée au changement climatique, conduisent à adapter le règlement et les prescriptions, elles n'auront pas pour conséquence de rendre inconstructible des zones qui seront constructibles sur la base de l'aléa de référence actuel, sauf cas très limité[8].

4.2.1 - Principes appliqués au zonage réglementaire dans le cadre de la submersion marine

4.2.1.a - Elaboration du zonage réglementaire

Le zonage est construit sur la base des règles rappelées dans le guide général PPR et complété par la circulaire du 27 juillet 2011 relative à la prise en compte du risque submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux et ses annexes :

« *Le PPRL devra prendre en compte* deux aléas distincts*, l'aléa de référence […] et un aléa à l'horizon 2100, avec une progressivité de la réglementation entre les deux conditionnée par le caractère urbanisé ou non de la zone considérée* »

1 S'agissant de l'aléa de référence actuel

Les principes généraux de prévention dans les zones soumises à un risque de submersion sont les suivants :

- les zones non urbanisées soumises au risque d'inondation, quel que soit son niveau, restent préservées de tout projet d'aménagement afin de ne pas accroître la présence d'enjeux en zone inondable,
- les zones déjà urbanisées ne doivent pas s'étendre en zone inondable peu ou pas urbanisée, et les secteurs les plus dangereux (zone d'aléa fort) sont rendus inconstructibles. Toutefois, dans les centres urbains denses, afin de permettre la gestion de l'existant et le renouvellement urbain, des adaptations à ce principe peuvent être envisagées si elles sont dûment justifiées dans le rapport de présentation du PPRL (exemple : dents creuses),
- d'une manière générale la vulnérabilité des zones urbanisées ne doit pas être augmentée.

Tableau de croisement aléa/enjeu

Nature de la zone	Aléa de référence		
	Faible	Modéré	Fort
Naturelle	Rouge	Rouge	Rouge
Urbaine	Bleu	Bleu ou Rouge	Rouge

Dans certains cas, le tableau offre un choix entre deux zonages possibles : une zone rouge inconstructible et une zone bleue constructible sous prescriptions. Il s'agit ici de rendre possible les adaptations permettant d'adapter le zonage en fonction de situations locales particulières.

L'aléa de référence conduit à définir les zones constructibles et inconstructibles.

8 Par exemple : une nouvelle zone qui serait non comprise dans la cartographie de l'aléa de référence et pour laquelle l'aléa à l'horizon 2100 serait fort doit être inconstructible.

2 S'agissant de l'aléa à l'horizon 100 ans

Pour caractériser l'aléa à l'horizon 100 ans, il convient de se référer aux prévisions du GIEC, reprises par l'ONERC, lesquelles se basent sur la notion d'aléa 2100. Cette notion d'aléa 100 ans sera donc évolutive en fonction de l'avancée des travaux scientifiques en la matière afin de retenir les dernières données disponibles arrêtées par le ministère.
La prise en compte du réchauffement climatique dans l'aléa horizon 100 ans n'a pas pour conséquence directe de rendre inconstructible les secteurs concernés (sauf rare exception essentiellement liée à la topographie du lieu, cf. infra). Dans ces zones, le périmètre et la nature des mesures de réduction de vulnérabilité à prescrire (hauteur de plancher, espace refuge…) seront définis à partir de l'aléa horizon 100 ans.
Cependant, dans le respect des principes guidant la réalisation des PPR, dans quelques cas limités, l'inconstructibilité sera la règle ou à étudier. Plus précisément, il s'agit d'un terrain situé dans la zone d'aléa 2100 (modéré ou fort), en zone naturelle, et dans une zone non soumise à l'aléa de référence à la date du PPRL) par exemple.
Ces principes généraux peuvent être synthétisés dans le tableau suivant :

Nature de la zone	Aléa de référence	Aléa horizon 100 ans		
		Faible	Modéré	Fort/Très fort
Naturelle	Nul	**Bleu**	**Rouge ou Bleu**	**Rouge**
	Faible	Rouge	Rouge	Rouge
	Modéré		Rouge	Rouge
	Fort/Très fort			Rouge
Urbaine	Nul	**Bleu**	**Bleu**	**Bleu**
	Faible	Bleu	Bleu	Bleu
	Modéré		Bleu ou Rouge	Bleu ou Rouge
	Fort/Très fort			Rouge

Dans certains cas, le tableau offre un choix entre deux zonages possibles : une zone rouge inconstructible et une zone bleue constructible sous prescriptions. Il s'agit ici de rendre possible les adaptations permettant d'adapter le zonage en fonction de situations locales particulières.

Encart 30 : Synoptique de production de la carte réglementaire sur la base de l'aléa actuel et 2100

La production de la carte réglementaire est le fruit du croisement de la cartographie des enjeux et de celle de l'aléa selon les règles rappelées ci-dessus.
Les cartes simplifiées ci-dessous illustrent les principes d'élaboration du zonage réglementaire.

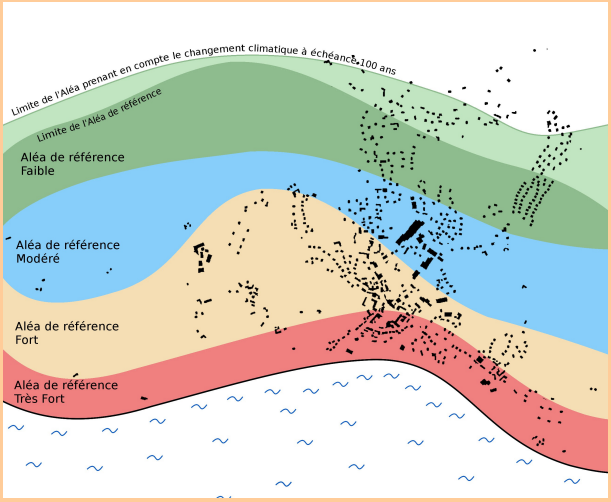


Illustration 70: Cartographie de l'aléa

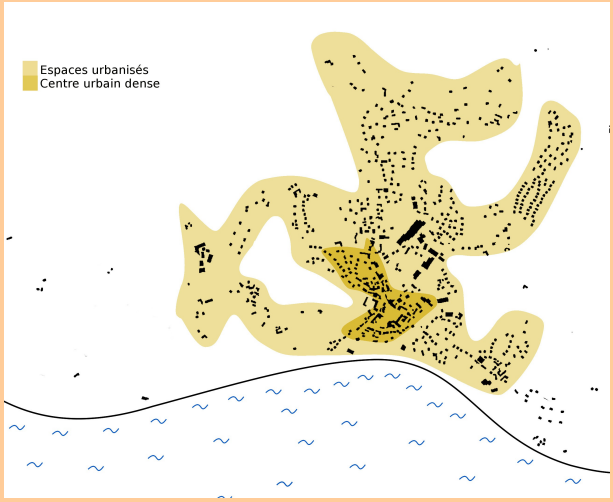


Illustration 69: Cartographie des enjeux

Le zonage réglementaire est réalisé en premier lieu sur la base de l'aléa actuel. Dans un second temps le zonage est complété sur la base de l'aléa à échéance cent ans.

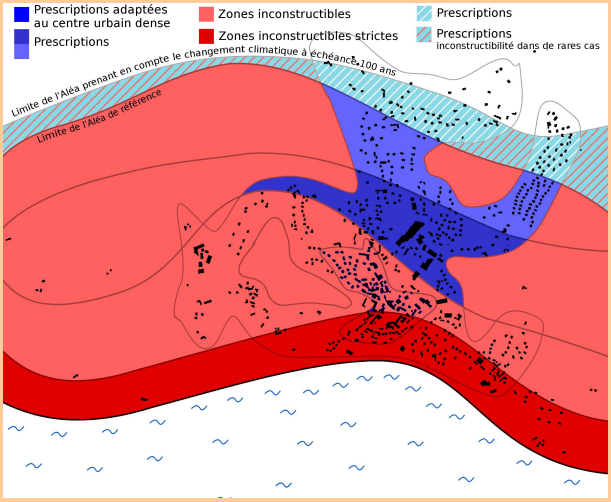


Illustration 71: Zonage réalisé sur la base de l'aléa de référence

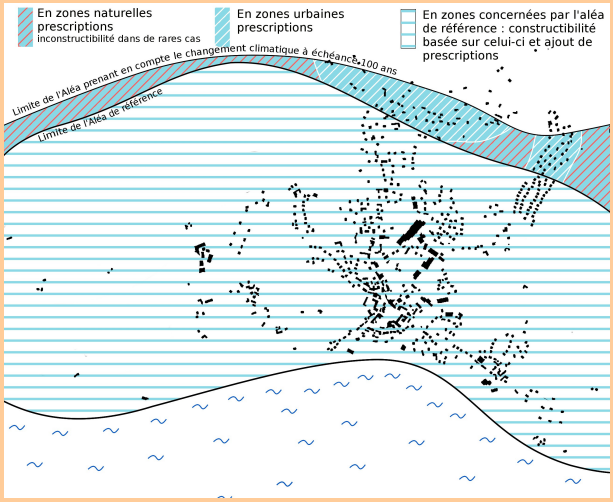


Illustration 72: Prise en compte de l'aléa 2100

4.2.1.b - La prise en compte des ouvrages de protection « résistant à l'aléa de référence »[9]

D'une manière générale, la présence d'ouvrages de protection sur le territoire du PPRL est prise en compte lors de la caractérisation de l'aléa, au travers des hypothèses de défaillance retenues pour ceux-ci qui conduiront à retenir un volume entrant moindre qu'en l'absence d'ouvrage.

Plus particulièrement, la prise en compte des ouvrages de protection « résistant à l'aléa de référence » s'effectue à plusieurs étapes :

- celle de l'établissement de l'aléa de référence, en limitant le volume entrant par des hypothèses de brèches,
- celle de l'établissement du zonage et du règlement associé, si une zone d'intérêt stratégique peut être identifiée (à la demande de la commune selon la procédure décrite ci-dessous).

Une dérogation au principe d'inconstructibilité : la qualification de zone d'intérêt stratégique (ZIS)

Introduit par la circulaire du 27 juillet 2011, le principe de la ZIS est de permettre, sous certaines conditions liées d'une part à l'ouvrage et à son entretien et d'autre part à des critères liés à la zone urbaine concernée, de rendre constructible des zones qui, en l'application des règles de droit commun du PPRL, ne le seraient pas. Celle dérogation a vocation à être admise de façon limitée et exceptionnelle, justifiée par des considérations liées à l'ouvrage protégeant la zone concernée mais également au projet.

Il est à noter que cette exception doit se faire à la demande expresse de la commune (ou de son groupement), après délibération du conseil municipal (ou communautaire) et transmission d'éléments techniques et justificatifs à l'appui de la demande (présence d'un projet structurant, pas d'alternative crédible à l'échelle du bassin de vie, etc.). Cette demande doit faire l'objet d'un processus de concertation avec les parties prenantes concernées (collectivité, propriétaire et gestionnaire de l'ouvrage, Etat…). Elle ne pourra être prise en compte que si le système de protection, le territoire et le projet considérés remplissent toutes les conditions détaillées ci-dessus.

1. Condition relative au territoire concerné :

Plus précisément, peut être qualifiée d'« intérêt stratégique » :

- une zone comprise dans une opération d'intérêt national, ou mobilisant des crédits au titre des Investissements d'avenir, ou faisant l'objet d'une Directive territoriale d'aménagement et de développement durable,
- une zone urbanisée, ou une zone en continuité d'une zone urbanisée :
  - porteuse d'un projet structurant,
  - s'il est démontré qu'il n'existe pas d'alternative crédible à l'implantation dans la zone protégée par la digue à l'échelle du bassin de vie (qui peut être intercommunal),
  - si l'intérêt économique est prouvé, au regard de la vulnérabilité de l'aménagement au risque de submersion,
  - s'il existe des réseaux et des infrastructures structurants déjà en place.

Les deux conditions mentionnées n'ont pas à être cumulatives. Aucune autre situation ne pourra être retenue.

9 Au sens du chapitre 6,2,2 de la circulaire du 27 juillet 2011

Périmètre de la ZIS :

L'identification d'une ZIS par la collectivité repose sur un diagnostic du territoire et de ses enjeux. Il ne peut donc être fixé de règle générale quant aux surfaces minimums et maximums à retenir, ou bien fixé en termes de pourcentage de surfaces, de possibilités de constructions, etc.

Le périmètre de la ZIS sollicité correspond au projet structurant que souhaite porter la collectivité. En fonction du projet et/ou de l'avancement de la réflexion, différentes situations sont envisageables comme un projet de densification d'un centre urbain ou bien la reconversion d'une friche industrielle, …

Les services de l'Etat apprécient le périmètre de la ZIS sollicitée au même titre que les autres éléments faisant parties des critères d'appréciation pour reconnaître le caractère de ZIS.

Zones non incluses dans le périmètre de la ZIS :

Certaines zones ne peuvent faire l'objet de cette exception et doivent demeurer strictement inconstructibles (cf. 2.4.5). Il s'agit :

- des zones dites en « cuvette » en aléa fort du fait des risques de montée rapide du niveau d'eau qui mettent en danger la vie des personnes en cas de surverse ou rupture de l'ouvrage,
- de la bande de précaution identifiée à l'arrière de l'ouvrage,
- des zones de très forte hauteur d'eau,
- des zones soumises à l'aléa recul du trait de côte ou migration dunaire,
- des zones d'écoulement préférentiel. Leur caractérisation est facilement identifiable en présence de thalweg. Dans le cas d'une topographie peu accentuée, l'exercice est plus délicat. Selon la fi nesse du modèle, il en effet probable que des zones d'écoulement préférentiel en zone urbaine ne soient pas détectables. Il ne s'agit pas de rechercher l'exhaustivité des zones d'écoulement préfé rentiel. Par conséquent, cette disposition vise à recenser les zones d'écoulement préférentiel les plus importantes.

2. Types de projets relevant d'une ZIS :

Le dispositif introduit par la circulaire du 27 juillet 2011 comprend, d'une part, des zones concernées par des projets identifiés (DTADD, opération d'intérêt national, liés à des crédits d'investissement d'avenir, …) et introduit, d'autre part, la notion de projet structurant. Cette dernière notion peut renvoyer à un projet stabilisé et abouti, porté par la collectivité ou un investisseur privé et de nature à satisfaire un intérêt supra-communal ou bien à un projet plus global comme densifier le centre urbain.

Il est à noter que certaines activités, comme les activités nécessitant la proximité de la mer, peuvent être autorisées en zone inconstructible (zone rouge). De ce fait, le dispositif de zone d'intérêt stratégique n'est pas nécessaire pour ces activités, ou plus largement pour un projet qui rentrerai dans le cadre classique des dérogations accordées à certaines activités ou projets en zone rouge (cf. infra – règlement en zone rouge).

En outre, il convient d'éviter l'exposition de certains bâtis et enjeux particulièrement vulnérables ou sensibles. **Il en est ainsi de certains bâtiments stratégiques liés à la gestion de crise, ou de bâtiments accueillant des populations sensibles comprenant un lieu de sommeil. Seront donc interdits, et ne peuvent faire l'objet d'une demande de ZIS, par exemple :**

- les bâtiments liés aux secours (caserne des services départementaux d'incendie et de secours et hôpitaux notamment),
- les crèches, les maisons de retraite, centre de convalescence, ...

3. Encadrement des projets dans le règlement lié à la ZIS

Cf. infra dans la partie règlement.

4. Conditions relatives aux ouvrages

Pour que l'ouvrage puisse être considéré comme résistant à l'événement de référence, les conditions suivantes doivent être réunies au moment de l'approbation du PPRL :

- **l'ensemble du système de protection de la zone considérée doit être en conformité avec la réglementation relative à la sécurité des ouvrages hydrauliques**. En particulier, le responsable de l'ouvrage doit être clairement identifié,
- **le responsable de l'ouvrage doit apporter la garantie que celui-ci est dimensionné pour contenir et résister à l'aléa de référence. Un ouvrage contient l'aléa de référence lorsque la côte d'arase de celui-ci est au moins égal à la côte de l'aléa de référence. Un ouvrage est dit résistant à l'aléa de référence lorsque celui-ci ne connaît aucun désordre sur un cycle de 2 à 3 marées suivant les conditions de la tempête de référence retenue.** Le responsable de l'ouvrage doit alors déposer un dossier engageant sa responsabilité, mentionnant la zone protégée et son niveau de protection (au moins égal au niveau correspondant à l'événement de référence du PPR) et comportant son engagement à maintenir sur le long terme ces ouvrages en conformité avec la réglementation relative au contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques et l'objectif de protection susmentionné. Le cas échéant, il peut être prévu (par convention) que la collectivité concernée se substitue au gestionnaire en cas de défaillance de celui-ci, en application de l'article L.211-7 du code de l'environnement (5è alinéa). Elle sera dans ce cas soumise aux obligations relatives à la sécurité des ouvrages hydrauliques,
- **le responsable doit être pérenne à l'échelle des politiques d'urbanisme** [10] (par exemple : structure publique),
- **la commune doit être dotée d'un plan communal de sauvegarde** détaillant les mesures d'alerte et de mise en sécurité des personnes en cas de rupture ou de surverse de l'ouvrage, ou un projet détaillé dont l'adoption est imminente et qui a déjà été présenté au préfet,
- **l'absence d'aggravation du risque sur l'existant** (dans et en dehors de la zone protégée) due à la poursuite de l'urbanisation dans la zone considérée doit être démontrée par le responsable de l'ouvrage (conformément à la réglementation relative à la sécurité des ouvrages hydrauliques),
- **l'ouvrage de protection doit disposer d'un dispositif de ressuyage des eaux** (issues des paquets de mer, des surverses locales et/ou du ruissellement urbain).

5. Reconnaissance de la ZIS et incidence sur le calendrier d'élaboration du PPRL

La phase de recensement des enjeux est un moment important de dialogue avec les collectivités. La confrontation entre les enjeux de la collectivité et la carte d'aléa peut permettre d'identifier en amont un enjeu nécessitant de recourir à la ZIS.

Il revient aux services de l'État de se prononcer sur la satisfaction de ces différents critères (cf. supra) pour octroyer la dérogation prévue par le texte. Il ne s'agit pas d'un droit pour la collectivité mais bien d'une faculté laissée à l'appréciation des services. Le PPR est certes concerté avec les collectivités, mais il est avant tout élaboré par l'État, sous la pleine et entière responsabilité du préfet. **L'État doit donc apprécier si, au regard des enjeux d'aménagement du territoire, croisés avec ceux de gestion des risques, le projet peut, par exemple, être qualifié de structurant ou d'intérêt stratégique. Il en est de même pour la justification de l'absence d'alternative crédible à l'implantation dans la zone protégée par l'ouvrage à l'échelle du bassin de vie.** Celle-ci est à apprécier en fonction du contexte local (communal, intercommunal et pratiques antérieures à l'échelle du département), permettant d'apprécier l'échelle pertinente.

L'analyse de l'opportunité de l'application de l'exception introduite pour une ZIS fera l'objet d'un examen au cas par cas et ne saurait se voir retenue pour l'ensemble des communes du littoral. En effet, la notion de ZIS, même dans la situation où l'ouvrage serait qualifié de résistant à l'aléa de référence, n'a pas vocation à être utilisée systématiquement sur toutes les zones urbaines.

10 Plusieurs décennies

En termes de procédures, la demande de reconnaissance de ZIS devra intervenir avant le début de la consultation officielle du conseil municipal sur la base du projet de PPRL arrêté par l'Etat, c'est-à-dire en amont de la phase préalable à l'enquête publique. Si la demande intervient à l'occasion de la consultation du conseil municipal et que celle-ci est ensuite retenue, il convient de recommencer l'ensemble de cette phase de consultation (consultation de la commune et enquête publique). En effet, la reconnaissance de la ZIS change l'économie générale du PPRL ce qui nécessite une nouvelle consultation.

6. Existence des conditions relatives à la reconnaissance de ZIS et pérennité dans le temps

Si l'une de ces conditions n'est pas remplie au moment de l'approbation du PPRL, la zone ne pourra être considérée comme protégée. Les éléments justifiant le respect de ces conditions devront être incorporés et détaillés dans le rapport de présentation. Il devra être également rappelé que la ZIS est subordonnée au respect de ces conditions cumulatives. Il est de la responsabilité du maire, à l'origine de la demande de reconnaissance de la ZIS, d'avertir le Préfet d'une modification/disparition de ces conditions.

Dans ce cas, les services de l'Etat prendront acte de la modification/disparition d'une des conditions demandée pour pouvoir bénéficier de la ZIS. Le cas échéant, les services en charge des risques devront informer les services en charge de l'urbanisme de faire usage de la procédure prévue à l'article R111-2 du code de l'urbanisme pour apprécier les demandes d'urbanisme qui seraient déposées. En effet, les conditions de sécurité pour les biens et les personnes n'étant plus réunies, le règlement prévu pour la ZIS ne pourra être appliqué jusqu'au retour à une situation permettant de satisfaire à l'ensemble des conditions cumulatives posées. Afin de prendre en compte cette modification de l'économie générale du PPRL, celui-ci devra être mis en révision pour procéder à la modification de zonage et supprimer la dérogation au principe d'inconstructibilité.

La ZIS devra être clairement identifiable et délimitée sur la carte de zonage par le biais d'une couleur rouge, indicée.

4.2.2 - Principes appliqués au zonage réglementaire dans le cadre du recul du trait de côte et de la migration dunaire

Pour le recul du trait de côte et la migration dunaire, le phénomène ne se produit pas de façon aléatoire mais progressivement et parfois inexorablement. Cependant, certains événements tempétueux majeurs peuvent rendre aléatoire la manifestation dans le temps de l'aléa.

Pour ces types d'aléas, la prévention des risques consiste à ne pas augmenter les enjeux dans les zones qui seront impactées par l'aléa à échéance cent ans. Ces zones doivent donc être classées en zone d'aléa fort et être rendues strictement inconstructibles. Le zonage ainsi opéré ne peut être adapté afin d'en diminuer les conséquences en termes de prescriptions. Ce principe conduit donc à maintenir les zones d'aléa fort en zone rouge dite inconstructible.

De plus, dans les zones soumises à un recul du trait de côte lié au réchauffement climatique (élévation du niveau de la mer), des prescriptions peuvent être édictées afin d'éviter l'implantation d'équipements et d'infrastructures structurants ou sensibles, ainsi que les zones de grands projets urbains de type ZAC. Ces mesures permettent de faciliter la mise en œuvre des actions préconisées par la stratégie de gestion intégrée du trait de côte.

4.2.3 - La représentation cartographique

Au même titre que les documents d'urbanisme, le zonage réglementaire des PPRL doit être suffisamment précis pour permettre de déterminer les parcelles concernées par les mesures d'interdiction et les prescriptions dans le cadre de la délivrance des autorisations d'occupation ou d'utilisation du sol.

La lisibilité de ce zonage passe par un choix pertinent de l'échelle du document, la précision du trait et le mode de représentation cartographique. Toutefois, ces dispositions n'ont ni pour objet ni pour effet d'imposer que ces documents fassent apparaître eux-mêmes le découpage parcellaire existant. Compte tenu de ces éléments de cadrage, le zonage réglementaire sera établi à une échelle du 1/10 000 voire du 1/5 000 pour les zones liées à de fortes concentrations d'enjeux par exemple.

Le standard de données COVADIS défini pour les PPRN un code couleur en fonction d'un type de réglementation standardisée. Conventionnellement, le rouge correspond aux zones où la règle générale est l'inconstructibilité, le bleu aux zones constructibles sous prescriptions.

Il est recommandé de réaliser les cartes de zonage réglementaires en respectant le standard COVADIS.

Pour des situations exceptionnelles et limitées, des couleurs ou trames spécifiques peuvent être réservées à la représentation de zones ayant une fonction ou nature particulière : zones d'aggravation des risques non directement exposées faisant l'objet de prescriptions particulières, bandes de sécurité situées derrière des ouvrages de protection, zones à réglementation spécifique, etc.

Pour éviter toute confusion dans la lecture des couleurs ou des valeurs, on renforcera la désignation des zones en ajoutant une lettre (R pour zone rouge et B pour zone bleue, par exemple) et des indices spécifiques numériques (secteurs BI, B2, etc.) si des mesures différentes s'appliquent dans les zones bleues ou rouges.

4.3 - Le règlement

Le règlement constitue l'aboutissement de la démarche d'élaboration du PPR. Il doit être conçu avec rigueur et rédigé dans un souci de clarté et de lisibilité.

Pour être parfaitement compréhensible par tous, le règlement sera concis et limité à son objet, en l'occurrence la définition des mesures applicables dans les zones réglementées. Les justifications et les explications de ces mesures trouvent leur place dans la note de présentation.

Les prescriptions pouvant être inscrites dans un PPR répondent aux objectifs suivants :

- la sécurité des personnes,
- la limitation des dommages aux biens et aux activités,
- le maintien, voire la restauration, du libre écoulement des eaux,
- la limitation des effets induits des inondations.

La sécurité des personnes est un impératif qui doit présider l'élaboration du PPRL. Par conséquent, ces principes généraux peuvent être déclinés à l'échelle du territoire en tenant compte, de manière limitée, des contraintes de développement de la collectivité. L'ensemble de la démarche devra rechercher à réduire la vulnérabilité des biens et des personnes exposés au risque.

Le règlement précise les mesures associées à chaque zone du document cartographique. Il distingue les zones non constructibles des zones constructibles sous prescriptions, précise les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde et définit les mesures applicables à l'existant pour en réduire la vulnérabilité, qui peuvent s'appliquer transversalement à ces zones.

En présence de différents aléas, il convient de s'assurer que les mesures prescrites au titre d'un aléa sont compatibles avec les autres aléas.

Toutefois, les occupants des zones couvertes par un PPR doivent pouvoir conserver la possibilité de mener une vie ou des activités normales dès lors qu'elles sont compatibles avec les objectifs de sécurité recherchés. L'article R.562-5 du code de l'environnement mentionne que le PPR ne peut interdire les travaux d'entretien et de gestion courants des bâtiments implantés antérieurement à l'approbation du plan sauf s'ils augmentent les risques ou en créent de nouveaux, ou conduisent à une augmentation de la population exposée. Les notions de travaux d'entretien et de gestion courante recouvrent notamment : les aménagements internes, les traitements de façade et la réfection des toitures, à la condition qu'ils n'augmentent pas les risques ou qu'ils n'en créent pas de nouveaux, et qu'ils ne conduisent pas à une augmentation de la population exposée.

4.3.1 - La réglementation des projets

Le guide PPR littoraux complète dans cette partie le contenu du guide général relatif aux PPRN auquel il convient de se référer pour l'élaboration du règlement et des prescriptions afférentes. Il s'agit de souligner ici les éléments particuliers à prendre en compte lors de l'élaboration du règlement. La référence aux fiches du Jurisques mis à jour annuellement (cf. encart 3 et annexe 5.4) peut également s'avérer utile pour des exemples pratiques de dispositions et de prescriptions applicables aux constructions et aménagements, aux mesures de prévention, de protection et de sauvegarde ainsi qu'aux mesures applicables aux biens et activités existants.

4.3.1.a - Les dispositions applicables en zones rouges

Les zones rouges seront rendues inconstructibles. Des exceptions peuvent être prévues dans le règlement, notamment pour le cas des dents creuses des centres anciens historiques comme définis par les guides relatifs à l'élaboration des PPRN et PPRI et par les circulaires en vigueur, sous réserve de l'édiction de prescriptions adaptées.

Le PPRL ne doit cependant pas empêcher une gestion raisonnable des zones rouges. On peut alors être conduit à permettre l'installation des projets et équipements comme :

- certaines infrastructures (réseaux de desserte),
- les constructions nécessaires au maintien d'une activité contribuant à la bonne gestion du territoire et compatible avec le risque telle qu'une activité agricole, sportive ou de loisirs,
- les équipements dont la fonction est liée à leur implantation, comme les portes d'écluses, les équipements portuaires, etc.
- les constructions, installations, ouvrages, aménagements destinés à réduire les conséquences du risque de submersion et d'érosion (ouvrages de « défense » contre la mer par exemple),
- les travaux destinés à la stabilisation et à la réduction des risques (drainage, terrassement, apports de matériaux, plantations),
- le dépôt de matériaux sableux en recharge sur l'estran ou le cordon dunaire sous réserve d'une étude démontrant l'innocuité de cette intervention sur le littoral voisin,
- le déplacement des sentiers en bordure de falaise en fonction du recul de celle-ci,
- la pose de ganivelles permettant de stabiliser les cordons dunaires,
- les activités nécessitant la proximité immédiate de la mer (cf. infra 4.3.1.d),
- etc.

De même, certains projets liés à la gestion de l'existant peuvent être autorisés s'ils sont explicitement mentionnés dans le règlement :

- les réparations ou reconstructions de biens sinistrés, sous réserve que la sécurité des occupants soit assurée et que la vulnérabilité de ces biens soit diminuée ;
- les travaux et les aménagements du bâti et de ses accès permettant de réduire le risque ;
- les extensions mesurées, qu'il conviendra de préciser en termes de surfaces ainsi que les modalités d'application : soit en % de la surface habitable, soit limitée à Xm², ou bien en application d'une surface maximale (exemple : 40m²). Une distinction peut être faite selon la nature des biens considérés (extensions au sol de bâtiments d'habitation existants, de bâtiments d'activités, d'industries, etc.). Ces exten-

sions doivent rester limitées dans leur emprise afin de ne pas aggraver fortement la vulnérabilité des biens et des personnes. En effet, le plus souvent les prescriptions constructives de réduction de la vulnérabilité sont limitées. Dans la mesure du possible il convient de retenir une surcôte de plancher.

Dans les secteurs exposés à des risques très forts, notamment là où l'alerte et l'évacuation des personnes n'est pas possible (derrière les digues par exemple), une très grande rigueur dans les possibilités d'aménagement est attendue.

Concernant la zone de choc de vagues, directement soumise à l'action des vagues et classée en zone rouge correspondant à un aléa fort ou très fort, un principe strict d'interdiction de construire devra y être recherché. Même les extensions du bâti existant seront à proscrire, dans la mesure où le bâti y est directement menacé de destruction par l'action des vagues.

4.3.1.b - Les dispositions applicables en zones bleues

Dans les zones bleues, les aménagements ou les constructions sont autorisés, sous réserve de respecter les prescriptions fixées et adaptées au risque. Ces prescriptions permettent de ne pas augmenter la vulnérabilité des personnes et des biens.

Certains projets nécessitent cependant une attention particulière et peuvent conduire à une réglementation plus sécuritaire. Cela concerne plus particulièrement :

- les établissements recevant du public sensible, difficilement évacuables : maison de retraite, hôpital, …,
- les ouvrages souterrains tels que les parkings qui accroissent la vulnérabilité des personnes,
- les bâtiments et centres opérationnels concourant à l'organisation des secours et à la gestion de crise.

Il conviendra de privilégier leur implantation en dehors des zones submersibles ou au minimum d'imposer des mesures fortes de réduction de la vulnérabilité.

Pour les submersions marines, on veillera à ce que la cote du plancher du premier niveau habitable soit fixée à une hauteur supérieure ou égale à la cote de l'aléa 2100, en construisant en surélévation. Par ailleurs, les équipements ou stockages de produits sensibles seront hors d'eau ou étanches. Les réseaux d'eaux pluviales et d'assainissement pourront requérir l'installation de clapets anti-retour.

4.3.1.c - Les dispositions applicables pour les zones d'intérêt stratégique

Le règlement de la ZIS doit être adapté et proportionné au projet à l'origine de la demande formulée par la collectivité visant à la reconnaissance de ZIS. Ainsi, si la ZIS est accordée pour un projet précis, seul celui-ci devra faire l'objet de la dérogation au principe d'inconstructibilité, de façon complémentaire par rapport aux dérogations accordées dans les zones rouge ou bleues.

En outre, il convient d'éviter l'exposition de certains bâtis et enjeux particulièrement vulnérables ou sensibles. **Il en est ainsi de certains bâtiments stratégiques liés à la gestion de crise, ou de bâtiments accueillant des populations sensibles comprenant un lieu de sommeil. Seront donc interdits, et ne peuvent faire l'objet d'une demande de ZIS, par exemple :**

- les bâtiments liés aux secours (caserne des services départementaux d'incendie et de secours et hôpitaux notamment),
- les crèches, les maisons de retraite, centre de convalescence, ...

D'une manière générale, le règlement de la ZIS ne peux poser de limite quant au nombre de personnes résidant dans la zone ainsi délimitée. Il serait difficile, voire illusoire, d'en fixer une limite.

Plus généralement, la réduction de la vulnérabilité résidera essentiellement au travers des mesures du PPRL. A ce titre, le règlement de la ZIS prévoit des mesures constructives sur les bâtiments neufs réduisant leur vulnérabilité (hauteur des planchers par exemple) mais également des mesures de réduction de la vulnérabilité sur l'existant. La mise en œuvre d'actions de réduction de vulnérabilité pourra également concerner les dessertes et réseaux qui peuvent jouer un rôle essentiel en cas de gestion de crise.

4.3.1.d - Questions transversales à l'ensemble des zones

1 Questions relatives à l'urbanisme

1/ cas des reconstructions après sinistre ou destruction du bâtiment

La reconstruction à l'identique d'un bâtiment détruit ou démoli depuis moins de dix ans est de droit. Cependant, il peut et doit être écarté lorsque la réalisation du risque (lié à l'aléa étudié dans le PPR) est à l'origine de la destruction du bâtiment. Il s'agit ici de protéger les biens et les personnes en interdisant la reconstruction d'un bâtiment dont les occupants seraient exposés à un risque certain et prévisible, de nature à mettre gravement en danger leur sécurité (Article L.111-3 du code de l'urbanisme).
Pour en savoir plus : cf. la fiche « l'interdiction de la reconstruction après sinistre dans un PPRN » dans Actes du groupe de travail relatif à la sécurisation du contenu réglementaire des plans de prévention des risques naturels prévisibles (catalogue.prim.net/105_ressources-juridiques_.html)

2/ le changement de destination

L'usage d'une construction est encadré par les 9 destinations prévues par le code de l'urbanisme. Le changement de destination correspond à la transformation d'une surface existante pour en changer l'usage.

Dans le cadre de l'élaboration du règlement du PPRL, il convient de s'interroger sur la possibilité d'autoriser les changements de destination. Dans le règlement, il peut être indiqué que des travaux sont admis sous réserve de ne pas augmenter la vulnérabilité du bien concerné. Sera considéré comme augmentant la vulnérabilité, un changement de destination qui augmente le risque global, comme par exemple la transformation d'une remise ou d'un commerce en logements.

Cependant, seule l'augmentation de la vulnérabilité est à éviter, alors qu'un changement de destination peut conduire à une diminution de vulnérabilité (par exemple la transformation d'un logement en commerce ou en garage). Ainsi, permettre le changement de destination sans augmentation de la vulnérabilité ouvre des possibilités de renouvellement urbain, tout en diminuant les conséquences négatives de inondations.

3/ les démolitions / reconstructions

A l'instar des changements de destination, les démolitions/reconstructions des bâtiments existants peuvent permettre de réduire les conséquences négatives des inondations par le renouvellement urbain. En effet, la reconstruction d'un bâtiment permet d'en réduire la vulnérabilité, par exemple en prenant en compte le niveau d'aléa pour déterminer la hauteur des planchers. Une telle mesure peut s'avérer plus efficace que de mettre en œuvre des mesures de réduction de vulnérabilité sur le bâtiment existant. De même, la reconstruction d'un bâti-

ment sur une même parcelle, mais dans la partie la moins exposée de celle-ci permet là encore de réduire sa vulnérabilité.

Ainsi, il est intéressant de permettre les opérations de démolition / reconstruction dans les zones rouges. Or, si le règlement ne le prévoit pas explicitement, l'opération sera rendue impossible par les autres règles de la zone rouge interdisant les constructions nouvelles, cette démolition/reconstruction (même dans les mêmes emprises) étant appréhendée par la réglementation en vigueur comme une nouvelle construction.

Il apparaît cependant indispensable d'encadrer strictement cette possibilité. La reconstruction doit se faire sur la parcelle, dans la même emprise au sol, sans donner lieu à la création de logements, d'activités ou de commerces supplémentaires. Le premier niveau de plancher sera fixé à une hauteur supérieure ou égale à la côte de l'aléa 2100[11].

La nature d'aléa très fort peut conduire à ne pas retenir cette disposition. En effet, dans certains cas, les mesures de réduction de la vulnérabilité sont sans effet, voire peuvent aggraver la situation (ex : vague de submersion passant au-dessus de la maison en situation historique et la construction d'un étage refuge pourrait conduire à une entrée d'eau dans la maison). Il conviendra d'attacher une attention particulière à ce point lors de l'élaboration du règlement du PPRL.

4/ les remblais

Les remblais constituent une entrave aux écoulements. Implantés de manière non maîtrisée, ils peuvent ainsi conduire à aggraver la situation de l'inondation en constituant par exemple des surélévations de la cote d'inondation, des îlots isolés, inaccessibles aux secours, ou encore des resserrements créant des lieux d'écoulements à grande vitesse.

De ce fait, il semble opportun d'interdire en zones rouges et bleues tous les travaux d'exhaussement, notamment les remblais, et en particulier les endiguements sauf s'ils sont de nature à protéger des lieux fortement urbanisés ou prévus dans le cadre d'un projet d'utilité publique. Le règlement peut prendre en compte certaines situations particulières.

2 Questions spécifiques au littoral

1/ modalités de prise en compte du changement climatique dans le règlement

Cas du recul du trait de côte

Si l'impact du changement climatique sur le trait de côte peut être qualifié, il est recommandé d'identifier une zone d'aléa recul du trait de côte spécifique à l'impact du changement climatique (au-delà de la zone de recul du trait de côte à 100 ans), en particulier dans les zones à forts enjeux ou très sensibles aux phénomènes d'érosion. Dans la zone supplémentaire ainsi définie, l'implantation de certains types d'enjeux, dont le coût de déplacement serait particulièrement élevé, peut être interdite : établissements sensibles de type hôpital, école, opérations d'aménagement importantes de type ZAC…

11 Lorsque cela est possible, il est communément admis de prévoir le premier niveau de plancher à 30 cm au-dessus de la cote de référence pour l'aléa concerné (ici l'aléa 2100)

Cas de la submersion marine

Que ce soit en zone naturelle ou en zone urbaine, le PPRL prend en compte deux aléas distincts : l'aléa de référence du PPRL, qui permet de définir les zones constructibles ou non, ainsi qu'un aléa à l'horizon 2100, qui conduit à définir des prescriptions, avec éventuellement une progressivité de la réglementation.

Dans les zones où les constructions sont permises, la prescription minimale pourra être que les premiers planchers habitables soient situés à la cote (ou au-dessus de la cote) de l'aléa 2100.

Dans les zones où l'aléa de référence est nul mais où l'aléa 2100 est présent, les constructions seront autorisées uniquement pour les zones urbaines et de développement futur identifiées préalablement. Cependant, l'implantation de certains types d'enjeux, dont le coût de déplacement serait particulièrement élevé, peut être interdite : établissements sensibles de type hôpital, école, opérations d'aménagement importantes de type ZAC…
Dans les zones naturelles non concernées par l'aléa de référence mais soumise à l'aléa 2100, les constructions seront interdites en zone d'aléa fort voire d'aléa modéré. Les exceptions prévues au titre de l'aléa de référence peuvent y être appliquées si celles-ci sont prévues dans le règlement (exemple : infrastructure, projet nécessaire au maintien d'une activité agricole, équipements de loisirs ou sportifs, …), sous réserve de prescriptions adaptées.

2/ les activités nécessitant la proximité immédiate de la mer

Les activités telles que la pêche, les services portuaires, la conchyliculture ou encore les activités nautiques liées à la plage, ne peuvent se situer que sur des espaces proches de la mer. Ces espaces étant directement exposés aux tempêtes marines, ces activités sont donc soumises à l'aléa, bien souvent fort. Pour autant, elles doivent pouvoir exister en bord de mer. Le règlement pourra donc instaurer une autorisation d'établir ces constructions et installations dans les zones soumises à la submersion marine, même en cas d'aléa fort. Cette dérogation doit toutefois exclure tous les types de logements. Il sera opportun de s'interroger sur leur opportunité dans les zones où l'aléa peut être qualifié de très fort, dans certaines zones soumises à l'action directe des vagues par exemple.

Sans prétendre à l'exhaustivité, il peut être admis que les bâtiments ou installations suivantes nécessitent la proximité immédiate de l'eau :

- les équipements et bâtiments directement nécessaires au fonctionnement des ports (capitainerie, bâtiments de stockage de matériel, bâtiments liés au carénage, etc),
- les installations des chantiers navals,
- les bâtiments et installation liés au cœur de l'activité portuaire : activités de chargement et de déchargement par exemple, les ateliers de mareyage, les criées, …,
- les bâtiments d'exploitations de conchyliculture,
- les installations techniques destinées aux activités nautiques (locaux nécessaires au stockage du matériel, à leur entretien, les sanitaires, …),
- les installations liées à une concession de plage,
- les postes de secours de plage, les sanitaires et les équipements des concessions de plage.

En revanche ne relèvent pas des activités nécessitant la proximité immédiate de la mer les activités suivantes (sans exhaustivité) :

- les centres de thalassothérapie, l'eau nécessaire aux soins pouvant être pompée et transférée sur une zone plus en retrait et moins exposée au risque par exemple,

- les équipements touristiques, y compris ceux liés à la présence d'un port (par exemple les casinos, boites de nuit ou encore immeubles de logements),
- les restaurants, même associés à des activités nécessitant la proximité de l'eau,
- les zones commerciales,
- Les logements touristiques ou pour les saisonniers,
- les campings.

Les exemples donnés dans les deux catégories ci-dessus pourront être complétés afin de tenir compte d'activités liées à un contexte local, sans toutefois autoriser des activités indiquées comme ne relevant pas de cette catégorie dans le présent paragraphe. Ce régime dérogatoire implique toutefois d'adjoindre des prescriptions qui devront être prévues avec discernement. Toute mesure participant à la réduction de la vulnérabilité doit être recherchée dès lors qu'elle est réaliste et compatible avec l'exercice de l'activité. Les prescriptions de hauteur de plancher, par exemple, permettent de préserver les équipements en cas d'événement tempétueux. Le niveau de la côte de plancher devra être apprécié lors de la rédaction du règlement, l'obligation d'avoir un plancher au-dessus de la cote de référence peut ne pas être toujours adaptée.
La mise hors eau des principaux éléments du circuit électrique peut être appropriée et permettre ainsi une reprise d'exploitation plus facilement.

3/ campings et stationnement de caravanes

Les campings représentent un enjeu d'occupation du sol particulièrement vulnérable aux inondations. Or, dans les zones littorales, ils sont nombreux et particulièrement fréquentés.

Leur présence au plus proche des bords de mer, parfois dans des secteurs naturels difficilement accessibles et évacuables, ainsi que leur occupation par des populations touristiques, non familières des niveaux de risque auxquels elles peuvent être exposés en font un enjeu très particulier. La tendance actuelle à l'occupation à l'année des campings accroît le risque auquel ils peuvent être exposées.

L'augmentation du niveau de service qu'ils proposent, l'extension des périodes touristiques, mais aussi la crise du logement qui poussent certaines populations à s'y installer sur de longues durées, sont autant de facteurs qui contribuent à un « durcissement » des campings du littoral, accroissant les risques par une occupation aux saisons les plus propices à des événements climatiques violents.

Dans ce contexte, le PPRL doit traiter les campings avec une attention particulière. Quel que soit le niveau d'aléa, la création de nouveaux campings doit être interdite. Pour les campings existants, leur extension peut être autorisée, sous réserve de non aggravation, voire de diminution de la vulnérabilité, c'est à dire sans création de nouveaux emplacements (cas d'un réaménagement d'un camping par exemple : déplacement des bâtiments recevant le public dans un secteur moins exposé).

Par ailleurs, le stationnement de caravanes sur parcelles privées doit être proscrite quel que soit le niveau de l'aléa.

4/ le domaine public maritime

Le PPRL peut être amené à réglementer le domaine public maritime, à en limiter les usages, dans le respect des procédures de délivrance des titres d'occupation temporaire ou des concessions de plage et en prenant en considération les opérations d'aménagement du trait de côte ainsi que les actions de protection contre la mer.

5/ règlement lié au recul du trait de côte

Le règlement de la zone rouge correspondant au recul du trait de côte peut être identique à celui de la zone rouge correspondant à la submersion. Cette « fusion » des zones permettra une meilleure lisibilité globale du règlement en le rendant plus simple. Toutefois, il est rappelé que lorsqu'il s'agit de recul du trait de côte, les exceptions pouvant être admises au titre de la submersion marine ne pourront être retenues, la zone ainsi définie étant strictement inconstructible. Aucune exception ne peut être envisagée en zone rouge, aucune construction ne sera donc admise dans cette zone.

Pour les côtes exposées à des reculs de falaise ou des glissements littoraux, afin d'éviter d'aggraver les risques, on peut prévoir un zonage au-delà de la limite de recul du trait de côté à 100 ans et y prescrire des dispositions préventives telles que le drainage des terrains ou le raccordement obligatoire à un réseau d'assainissement.

4.3.2 - Les mesures de prévention, protection et sauvegarde

Au-delà de la réglementation des projets présentée ci-dessus, le règlement peut également prescrire des mesures de prévention, de protection et de sauvegarde.

Les mesures de prévention ont par exemple pour objectif l'amélioration de la connaissance des aléas par des études spécifiques, la mise en place de systèmes de surveillance ou d'alerte ou bien encore l'information des populations, …

Les mesures de protection visent la réduction des aléas par des techniques actives ou passives telles que le confortement des falaises, la limitation des accès, l'entretien d'ouvrages, les digues, etc.
Le PPR peut préconiser des mesures de protection, qui sont par nature de plus grande envergure comme la réalisation d'études et de travaux, à mener à l'échelle du bassin de risques.

Les mesures de sauvegarde portent sur la gestion de la sécurité publique en cas de sinistre telle que la réalisation d'un plan de secours ou l'identification d'un espace refuge pour les établissements recevant du public, ou les conditions d'utilisation des infrastructures (largeur de la voirie nécessaire à l'intervention des secours ou zones d'accès hors d'eau en cas d'inondation).

A ce titre, le règlement peut :

- définir des règles relatives aux réseaux et infrastructures publics desservant son secteur d'application et visant à faciliter les éventuelles mesures d'évacuation, d'intervention des secours ou de gestion de crise,
- prescrire aux particuliers ou à leurs groupements la réalisation de travaux contribuant à la prévention des risques et leur confier la gestion de dispositifs de prévention des risques en cas de survenance des phénomènes considérés,
- subordonner la réalisation d'aménagements nouveaux à la constitution d'associations syndicales chargées de certains travaux nécessaires à la prévention des risques, notamment l'entretien des espaces et, le cas échéant, la réalisation ou l'acquisition, la gestion et le maintien en condition d'ouvrages ou de matériels.

Il peut également s'agir de moyens légers ou non-structurels, le plus souvent mis en œuvre par des collectivités :

- instrumentation et surveillance de sites ou d'ouvrages,
- information sur les risques et les précautions à prendre, sur la fragilité des espaces dunaires, etc.,

- signalisation du danger dans les zone d'effondrement, d'éboulement, de migration dunaire, de franchissement de paquets de mer, etc.,
- limitation ou suppression d'accès au littoral ou aux dunes,
- élaboration de plans de secours et d'évacuation,
- aménagement d'itinéraires d'accès ou d'évacuation en cas de danger.

Les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde ne peuvent cependant porter sur des études et des travaux ayant pour objectif d'autoriser des projets nouveaux dans les secteurs d'aléa fort.

4.3.3 - Les mesures sur les biens et activités existants

Ces mesures visent l'adaptation, par des études ou des travaux, des biens situés dans les zones réglementées par le PPRL suivant l'objectif de réduire leur vulnérabilité. Elles peuvent concerner l'aménagement de ces biens, leur utilisation mais également leur exploitation. Les mesures liées à l'utilisation des biens visent l'adaptation de l'usage des biens au risque. Les mesures liées à l'exploitation des biens visent, quant à elles, la modification des pratiques ou de leur gestion.

Les mesures liées à l'aménagement des biens existants peuvent être réparties selon trois catégories en fonction de leur finalité :

- la sécurité des personnes : espace refuge pour les inondations,
- la limitation des dommages aux biens : utilisation de matériaux plus résistants à l'eau, batardeaux, déplacements des installations les plus sensibles et onéreuses (chaudières, etc.),
- les constructions ou les aménagements situés dans la zone de choc de vagues : renforcement par des techniques et matériaux résistants.

Les mesures doivent être classées en fonction des catégories d'enjeux auxquelles elles s'adressent : maisons individuelles, entreprises, locaux commerciaux, établissements recevant du public, etc.

La rédaction de chacune des mesures dans le règlement doit faire clairement apparaître la personne à qui incombe la mesure ainsi que le délai fixé, le cas échéant, par le PPR pour sa réalisation. Les mesures rendues obligatoires dans un délai inférieur à cinq ans, doivent apparaître clairement par opposition aux autres mesures définies.

A défaut de mise en conformité dans le délai prescrit, le préfet peut, après mise en demeure non suivie d'effet, ordonner la réalisation de ces mesures aux frais du propriétaire, de l'exploitant ou de l'utilisateur.

Les travaux de prévention imposés à des biens construits ou aménagés conformément aux dispositions du code de l'urbanisme avant l'approbation du plan et mis à la charge des propriétaires, exploitants ou utilisateurs ne peuvent porter que sur des aménagements limités dont le coût est inférieur à 10 % de la valeur vénale ou estimée du bien à la date d'approbation du plan (article R.562-5 du code de l'environnement).
Les obligations porteront prioritairement sur la sécurité des personnes. Par exemple, il peut être rendu obligatoire (ou recommander selon les situations) de réaliser un espace refuge, correspondant en une pièce de 6m² + 1m² par personne, pièce devant être accessible aux secours et située hors aléa (étage ou comble avec possibilité d'accès par l'extérieur à cette pièce).

Selon les situations et l'importance des travaux induits par les mesures ainsi définies, le règlement pourra comporter également des mesures d'adaptation des biens visant la réduction des dégâts causés par le phénomène.

Les mesures sur l'existant seront le plus souvent des mesures visant à réduire la vulnérabilité des enjeux exposés, et par conséquent à éviter ou réduire les dommages en cas de sinistre.

Pour en savoir plus : cf la fiche « Mesures de réduction de la vulnérabilité applicables à l'existant dans les PPRN » dans Actes du groupe de travail relatif à la sécurisation du contenu réglementaire des plans de prévention des risques naturels prévisibles (catalogue.prim.net/105_ressources-juridiques_.html)

5 - Annexes

5.1 - Glossaire

5.1.1 - Glossaire général

5.1.1.a - Définitions générales

Pour mener à bien le travail d'élaboration du PPR dans ses différentes séquences, il est indispensable de s'entendre sur la définition des termes les plus couramment utilisés. Or les recherches entreprises montrent qu'il n'existe pas de terminologie claire et précise qui fasse l'unanimité des experts des différents risques. De ce fait, les mots recouvrent quelquefois des significations très éloignées. La terminologie de référence proposée ci-après, perfectible, n'a d'autre finalité que de disposer d'un langage commun pour l'élaboration des PPR littoraux. Élaborée dans le cadre des présents travaux, en s'appuyant sur les définitions existantes et sur l'usage courant, elle contribuera aux travaux engagés par ailleurs pour l'actualisation du guide général Plans de Préventions des Risques Naturels prévisibles (PPR).

- Aléa : Conséquences physiques résultant d'un scénario d'événements (par exemple : recul du trait de côte, submersion). *L'aléa est caractérisé par son occurrence et son intensité (pour certains aléas). Il peut être qualifié par différents niveaux (fort, modéré, faible).*

- Bassin de risque *: Entité géographique pertinente pour l'analyse de l'aléa soumise à un même phénomène naturel. Il s'agit par exemple d'un bassin versant hydrologique, d'un tronçon homogène d'un cours d'eau, d'un versant présentant un ensemble de critères caractérisant son instabilité (nature géologique, valeur de la pente, circulation d'eau, etc.), d'un massif boisé bien délimité ou encore d'une zone de forte déclivité propice aux avalanches (source guide PPRN, 1997).*

- Concomitance de phénomènes naturels : Manifestation simultanée de deux ou plusieurs phénomènes naturels.

- Phénomène naturel : Élément physique naturel, de toute nature et temporalité (*exemple : marée, houle, vent, etc.).*

- Enjeux : personnes, biens, activités, moyens, patrimoine bâti, culturel ou environnemental etc. susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel. Les enjeux s'apprécient aussi bien pour le présent que pour le futur. Les biens et activités peuvent être évalués monétairement, les personnes exposées dénombrées, sans préjuger toutefois de leur capacité à résister à la manifestation du phénomène pour l'aléa retenu.

- Événement naturel : Phénomène naturel ou concomitance de phénomènes naturels potentiellement dommageables marquant une rupture ou une discontinuité avec une situation initiale ou antérieure. *L'événement est attaché à un lieu donné et survient à une date donnée, connue ou inconnue. Exemples d'événement : glissement de terrain tel jour à tel endroit, rupture d'un cordon naturel, tempête, etc.*

- **Période de retour** : Variable (en unités de temps) caractérisant la probabilité d'apparition ou de dépassement d'un phénomène naturel ou d'un événement naturel. Une période de retour de 100 ans (ou centennale) indique que le phénomène naturel ou l'événement naturel considéré a chaque année 1 chance sur 100 d'être égalé ou dépassé.

- Risque : Le risque résulte du croisement de l'aléa et d'un enjeu vulnérable. *Pertes potentielles en personnes, biens, activités, éléments du patrimoine culturel ou environnemental (cf Directive Inondation) consécutives à la survenue d'un aléa.*

- Scénario d'événements : Enchaînement d'événements naturels et technologiques, considéré à l'échelle du bassin de risque.

- Secteur d'étude : Secteur nécessitant des investigations pour définir les aléas sur le bassin de risque. Il peut donc être plus étendu que le bassin de risque.

- Sur-aléa : Aggravation de l'aléa ou changement de sa nature dont l'origine est un événement naturel ou technologique qui n'est pas compris dans le scénario d'événements initial.

Enfin, plusieurs termes spécifiques à la prévention des risques revêtent un sens particulier.

- **Bande de précaution** : Il s'agit de la zone, située derrière un ouvrage de protection contre la submersion marine, où, suite à une surverse, des brèches ou une rupture totale, la population serait en danger du fait des très fortes vitesses d'écoulement. Cette bande de précaution doit être rendue inconstructible dans le règlement du PPR.

- Caractérisation de l'aléa : Détermination des caractéristiques ou grandeurs de l'aléa, qui peuvent être quantifiées ou qualifiées. *Pour l'aléa submersion marine, ce peut être la détermination des hauteurs d'eau, de la dynamique de submersion, etc.*

- Cartographie : Représentation de caractéristiques ou grandeurs sur une carte.

- **Qualification de l'aléa** : Détermination qualitative d'un niveau d'aléa, classiquement fort, modéré ou faible. Cette qualification s'appuie traditionnellement sur l'analyse combinée de l'occurrence et de l'intensité de l'aléa déterminées par ses caractéristiques ou grandeurs physiques (hauteur, vitesse…).

5.1.1.b - Notion de « référence »

L'élaboration d'un plan de prévention des risques (PPR) nécessite l'analyse des événements naturels, des scénarios d'événements, et des aléas les plus pertinents du point de vue de la prévention des risques. On désigne ces éléments retenus pour l'analyse à l'échelle du bassin de risque comme les éléments « de référence ».

Dans ce guide, on appelle donc :

- Aléa de référence : Enveloppe des aléas correspondant aux scénarios de référence. L'aléa de référence prend en compte des événements naturels et éventuellement technologiques. L'aléa de référence est utilisé pour établir le zonage réglementaire du PPR.

- Événement naturel de référence : Événement naturel retenu, parmi les différents événements dommageables possibles, du fait de son impact le plus pénalisant à l'échelle d'un secteur d'étude cohérent pour l'analyse de son impact. Un *événement de référence peut être décrit par un ou plusieurs phénomènes naturels caractéristiques. Ainsi, un événement naturel de référence pour la détermination de l'aléa submersion marine est décrit par un niveau marin qui est dit « niveau marin de référence » et par une hauteur de vague associée.*

- Scénarios de référence : Ensemble des scénarios d'événements retenus à l'échelle du bassin de risque pour la détermination de l'aléa de référence, les réalisations simultanées de ces scénarios pouvant être incompatibles, c'est-à-dire des scénarios qui sur un territoire donné sont susceptibles de se produire mais qui en pratique ne se produisent pas simultanément.

5.1.2 - Glossaire technique

Accrétion (ou engraissement ou accumulation) : Progression de la ligne de rivage par accumulation de sédiments.

Avant-côte : Espace ou domaine côtier sous le niveau des plus basses mers, proche du rivage, concerné par des échanges avec la côte.

Arrière-côte : Espace terrestre du rivage situé au-dessus du niveau des plus hautes mers.

Budget sédimentaire (ou bilan sédimentaire) : Bilan des apports et des pertes en sédiments sur une zone.

Caoudeyre : Excavation circulaire laissant apparaître le sable nu au milieu des surfaces végétalisées du cordon dunaire. Une caoudeyre peut être frontale, de plateau ou de deuxième ligne.

Cellule sédimentaire (ou unité sédimentaire) : Cellule du littoral indépendante du point de vue des transits sédimentaires (cf. Erreur : source de la référence non trouvée.)

Climat de houle (ou climatologie de houle) : Caractéristiques des houles (hauteur, période, direction, etc.) en un point.

Corrélogramme : Corrélation entre deux variables dans le temps.

Dérive littorale : Flux de sédiments sensiblement parallèle au rivage, en proche côtier, résultant de différentes causes : vagues, courants, vent.

Digues côtières : ouvrages construits par l'homme, généralement longitudinaux, dont la vocation principale est de faire obstacle à l'écoulement et de limiter les entrées d'eau sur la zone protégée. Ils possèdent deux talus visibles (côté terre et côté mer) éventuellement confortés. Ces ouvrages ont pour fonction principale la protection contre la submersion et permettent de protéger des enjeux. Elles peuvent être situées sur le trait de côte ou en *arrière-côte* en tant que protection de seconde défense.

Dune (ou cordon dunaire) : Formation sableuse d'origine éolienne, généralement parallèle à la côte.

Érosion (ou démaigrissement) : Perte de sédiments pouvant entraîner un recul du trait de côte ou un abaissement de l'estran ou de la plage.

Estran : Espace compris entre le niveau des plus hautes et des plus basses mers connues ou zone de balancement des marées.

États de mer : Agitation locale de la mer due à la superposition de la mer du vent et de la houle.

Falaise : Escarpement vertical ou sub-vertical.

Flèche littorale : Forme constituée par l'accumulation de matériaux meubles (sables ou galets) entre un point d'ancrage à une extrémité et une pointe libre à l'autre extrémité s'avançant en mer.

Horsain : En statistique, donnée tirée d'un échantillon d'observations significativement distante de la distribution de probabilités qui décrit cet échantillon.

Hauteur significative : hauteur caractéristique de l'état de mer, estimée par une analyse statistique des vagues (moyenne du tiers supérieur des hauteurs des vagues observées sur une durée finie), ou par une analyse spectrale (à partir du moment d'ordre zéro de la densité spectrale).

Houle : Oscillation régulière de la surface de la mer, observée en un point éloigné du champ de vent qui l'a engendrée, dont la période se situe autour de dix secondes.

Jet de rive : Masse d'eau projetée sur un rivage vers le haut d'un estran par l'action de déferlement des vagues (En anglais : swash).

Mer du vent : Système de vagues observé en un point situé dans le champ de vent qui les a générées. La mer du vent présente un aspect chaotique.

Morphodynamique : Discipline consacrée à l'étude des formes littorales et à leur évolution sous l'action de facteurs hydrodynamiques et éoliens.

Niveau d'eau : Niveau intégrant les effets de la marée et de la surcote météorologique.

Niveau marin à la côte : Niveau marin à prendre en compte pour l'étude de l'aléa submersion marine. Il prend en compte l'ensemble des phénomènes influant sur le niveau et est déterminé à partir du niveau d'eau et des vagues. Il est appelé aussi niveau marin total.

Niveau marin de référence : niveau marin à la côte associé à l'événement de référence.

Profil de plage : Topographie de la plage représentée dans un plan vertical orienté de la terre vers la mer.

Ouvrage de protection côtier : Structure côtière construite et dimensionnée ayant pour objectif d'atténuer les impacts de phénomènes naturels sur un secteur géographique particulier appelé zone protégée. Il répond à une vocation initiale de fixation du trait de côte, de lutte contre l'érosion, de soutènement des terres, de réduction des franchissements, de dissipation de l'énergie de la houle ou d'obstacle à l'écoulement.

Platier : Étendue rocheuse à l'affleurement sur l'estran.

Polder : Zone basse conquise sur la mer par endiguement.

Run-up : Altitude maximale atteinte par le jet de rive.

Seiche : Oscillation libre ayant le caractère d'une onde stationnaire de la surface d'un plan d'eau fermé ou semi-fermé (lac, bassin, baie), de période supérieure à la minute.

Set-up (ou wave set-up) : cf. Surcote liée aux vagues.

Structure côtière de protection : Entité naturelle ou anthropisée ayant un impact sur le littoral en modifiant localement les phénomènes hydrauliques ou sédimentaires et jouant un rôle de protection face aux aléas littoraux.

Submersion : Action de submerger/d'inonder. Par convention, on emploiera de manière indifférenciée les termes inondation et submersion.

Subsidence : Abaissement du niveau de la surface de la croûte terrestre par mouvement tectonique.

Surcote : Différence positive entre le niveau marégraphique observé/mesuré et le niveau de marée prédite.

Surcote liée aux vagues : Surcote locale provoquée par la dissipation d'énergie liée au déferlement des vagues.

Surcote météorologique : Surcote provoquée par le passage d'une dépression et prenant en compte les effets du vent, de la pression (surcote barométrique inverse) et des effets dynamiques liés au déplacement de l'onde de surcote.

Surrection : Relèvement du niveau de la surface de la croûte terrestre par mouvement tectonique.

Système de protection/de défense : Système globalement cohérent du point de vue hydraulique pour la protection effective des populations situées dans la zone protégée. Il peut être constitué de plusieurs structures ou éléments de protection, pouvant être de différents types : un système de digues (c'est-à-dire des digues de premier et de second rang), des structures naturelles (cordons dunaires ou cordons de galets), des remblais, dont l'objectif premier ne serait pas la protection contre la submersion. Il peut être complété par d'autres protections comme les dispositifs de drainage, de stockage et d'évacuation des eaux et les ouvrages « maritimes » contribuant à leur maintien (type brise-lames, épis, etc.) éventuellement associés.

Trait de côte : défini, en matière de cartographie marine et terrestre, comme la ligne portée sur la carte séparant la terre et la mer. L'évolution de la position du trait de côte permet de rendre compte de la dynamique côtière. Différentes définitions, ou plutôt différents indicateurs de sa position, co-existent et peuvent être adoptées pour tenir compte de la diversité des morphologies du littoral.

5.2 - Sigles

ANEMOC : Atlas Numérique des Etats de Mer Océaniques et Côtiers
BD ALTI : Base de Données Altimétrique de l'IGN
BDHI : Base de Données des événements Historiques d'Inondation
BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière
CANDHIS : Centre d'Archivage National des Données de Houles In-Situ
CEMAGREF : Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts
CETE : Centre d'Études Techniques de l'Équipement
CETMEF : Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales
CERTU : Centre d'Études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques
CM : Cote Marine
DDTM : Direction Départementale des Territoires et de la Mer
DGALN : Direction Générale, de l'Aménagement, du Logement et de la Nature
DGPR : Direction Générale de la Prévention des Risques
dGPS : GPS différentiel (en anglais *Differential Global Positioning System*)
DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (en français, CEPMMT – Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme)
EPTB : Établissement Public Territorial de Bassin
IGN : Institut Géographique National
IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
ONERC : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique
ONF : Office National des Forêts
MEDDTL : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement
NCEP : National Centers for Environmental Prediction
NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration
MNE : Modèle Numérique d'Élévation
MNT : Modèle Numérique de Terrain
PCS : Plan Communal de Sauvegarde
PPR : Plan de Prévention des Risques
PPRL : Plan de Prévention des Risques Littoraux
RGE : Référentiel Grande Échelle
SCOH : Service de Contrôle des Ouvrages Hydrauliques
SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
SIOUH : Système d'Information des Ouvrages Hydrauliques

5.3 - Synthèse des résultats attendus lors de l'étude des aléas littoraux

Phase 1

Les résultats obtenus après la phase d'analyse générale du fonctionnement du littoral par les différentes investigations réalisées sont consignés dans un rapport d'étude. Il récapitule :

- la liste des données recensées, les contacts pris, les sites internet consultés, etc.,
- la bibliographie comprenant le recensement exhaustif des études menées sur le site auparavant,
- la synthèse des principaux résultats de la bibliographie,
- les analyses complémentaires menées.

Un cahier de cartes de synthèse (à des échelles du 1/10 000e ou 1/100 000e) peut être établi. Il comprend :

- les cartes anciennes recensées,
- une carte géologique,
- une carte identifiant l'ensemble des sédiments meubles mobilisables à partir des cartes géologiques et des cartes anciennes,
- une carte des phénomènes naturels : principales directions de propagation des houles, zones fortement exposées à la houle, principales zones soumises aux franchissements, zones basses (superposition topographie/niveau marin de référence), localisation et cote des points bas,
- une carte de l'évolution du trait de côte : positions successives, dates d'implantation des ouvrages, sens du transit littoral, risque de rupture des cordons naturels,
- une carte des ouvrages et structures de protection : localisation des ouvrages, type d'ouvrage,
- une carte de synthèse des événements historiques : localisation des zones inondées par événements, des principaux dégâts sur les ouvrages, des brèches historiques, des principaux reculs.
- une carte de synthèse des zones qui ne sont pas directement soumises aux aléas mais où certains aménagements ou activités pourraient aggraver les aléas ou en initier de nouveaux.

Phase 2

Recul du trait de côte

Les résultats obtenus par les différentes investigations réalisées sont consignés dans un rapport d'étude récapitulant :

- la liste des données et informations mobilisées,
- les méthodologies employées et la justification des hypothèses,
- les analyses menées,
- les résultats.

Un cahier des cartes de synthèse (du 1/5 000e au 1/10 000e) est produit. Il comprend :

- une carte reprenant les différentes positions du trait de côte historiques disponibles, la délimitation des cellules hydro-sédimentaires, les ouvrages de protection, les secteurs de comportement homogène, le sens des transits, les vitesses d'évolution du trait de côte,
- une carte de l''aléa recul du trait de côte de référence, précisant si possible les incertitudes et intervalles de confiance associés,

- si possible, une carte de la position du trait de côte estimée à échéance 100 ans avec prise en compte du changement climatique. Les positions estimées du trait de côte à échéance 20 et 50 ans peuvent également être précisées.

Migration dunaire

Les résultats obtenus par les différentes investigations réalisées sont consignés dans un rapport d'étude récapitulant :

- la liste des données et informations mobilisées,
- les méthodologies employées et la justification des hypothèses,
- les analyses menées,
- les résultats.

Un cahier des cartes de synthèse (du 1/5 000e au 1/10 000e) peut être établi. Il comprend :

- une carte reprenant les différentes positions du front dunaire disponibles, les différentes positions du trait de côte disponibles, les ouvrages de protection, les secteurs de comportement homogène, les vitesses d'évolution de la dune (côté terre) et éventuellement de l'évolution de l'étendue (surface) de celle-ci,
- une carte d'aléa migration dunaire.

Submersion marine

Les résultats obtenus par les différentes investigations réalisées sont consignés dans un rapport d'étude récapitulant :

- la liste des données et informations mobilisées,
- les méthodologies employées et la justification des hypothèses,
- les analyses menées,
- les résultats.

Enfin, un cahier des cartes de synthèse (en général : 1/25 000e agrandi au 1/10 000e sauf cas particuliers nécessitant des cartes plus précises) peut être établi. Plusieurs types de carte y sont intégrés :

- une carte de synthèse des modes de submersion et écoulements : linéaire soumis aux franchissements, linéaire soumis aux débordements, points d'entrée,
- une carte de synthèse identifiant les ouvrages de protection, les cordons naturels et les remblais jouant un rôle contre la submersion marine et présentant leurs hypothèses de défaillance,
- une carte informative basée sur la méthode de superposition topographie/niveau marin de référence (si méthode employée pour les cartes suivantes différente de celle-ci) : carte des secteurs de dynamique forte, carte des hauteurs d'eau,
- une carte d'aléa basée sur l'événement de référence (sans prise en compte de l'effet des ouvrages) : carte des secteurs de dynamique forte, carte des hauteurs d'eau,
- une carte de l'aléa de référence (avec prise en compte de l'effet des ouvrages actuels), carte des secteurs de dynamique forte, carte des hauteurs d'eau,
- une carte de l'aléa à échéance 100 ans (avec prise en compte de l'effet des ouvrages actuels), carte des secteurs de dynamique forte, carte des hauteurs d'eau,
- en tant que de besoin, les cartes d'aléas chocs de vagues et projections de matériaux.

Et éventuellement, à titre d'information (hors champ du PPR) :

- une carte d'aléa basé sur un événement fréquent,
- une carte de l'aléa extrême, basé sur un événement rare.

5.4 - Références juridiques concernant les PPR naturels

JURISQUES – Prévention des risques naturels
Jurisprudence commentée – 9ème édition, juin 2012

Consultable sur jurisprudence.prim.net

Extraits du sommaire

3. PLANS DE PREVENTION DES RISQUES NATURELS PREVISIBLES (P.P.R.)

CHAPITRE 4 : ELABORATION DU P.P.R.

FICHE 10 : SCHEMA D'ELABORATION DU P.P.R.

FICHE 11 : PRESCRIPTION DU P.P.R.

FICHE 12 : CONSULTATION DES ACTEURS, LA CONCERTATION AVEC LA POPULATION ET L'ASSOCIATION DES COLLECTIVITES TERRITORIALES DANS LES P.P.R.

FICHE 13 : ENQUETE PUBLIQUE DU P.P.R.

FICHE 14 : APPLICATION ANTICIPEE DES DISPOSITIONS D'UN PROJET DE P.P.R.

FICHE 15 : APPROBATION ET PUBLICATION DU P.P.R.

FICHE 16 : REVISION ET MODIFICATION DU P.P.R.

CHAPITRE 5 : CONTENU DU P.P.R.

FICHE 17 : NOTE DE PRESENTATION DU P.P.R.

FICHE 18 : DOCUMENTS GRAPHIQUES DU P.P.R.

FICHE 19 : REGLEMENT DU P.P.R.

FICHE 19 : REGLEMENT DU P.P.R.

I. Interdictions et prescriptions
II. Mesures de prévention, de protection et de sauvegarde
III. Mesures applicables aux biens et activités existants

CHAPITRE 6 : EFFETS DU P.P.R.

FICHE 20 : EFFETS DU P.P.R. SUR LES DOCUMENTS D'URBANISME

FICHE 21 : SANCTIONS ATTACHEES AU NON-RESPECT DU P.P.R.

5.5 - Principales références bibliographique

Almeida L. P., et al. (2011) - Geoprocessing tool to model beach erosion due to storms: application to Faro beach (Portugal). Journal of Coastal Research, SI 64, (ICS2011), p. 1830 - 1834.

Aubié S. Mallet C. et Favennec J. en collaboration avec Hoareau (2011). Caractérisation de l'aléa érosion (2020-2040) de la Côte Aquitaine dans le cadre de l'étude stratégique de gestion du trait de côte. Observatoire de la Côte Aquitaine, Rapport BRGM RP-59095-FR.

Bruun P. (1962). Sea level rise as a cause of shore erosion. Journal of Waterways and Harbors Division, American Society of Civil Engineers, 88 : 117-130.

Bruun P. (1983). Review of conditions for uses of the Bruun rule of erosion. *Coastal Engineering*, vol. 7, n°1, p. 77-89.

Bruun P. (1954) - Coast erosion and the development of beach profiles. Beach Erosion Board Technical Memorandum n°44.US Army Corps of Engineers, Washington, D.C. 79p.

Bulteau T., Pedreros R. et Thiebot J. (2012). Utilisation du code JOIN-SEA pour le calcul des probabilités conjointes. Rapport BRGM/RP-61372-FR.

CETE Nord-Picardie et CETE Normandie-Centre (2012). Plan de Prévention des Risques Naturels de la Bresle - Cartographie des aléas, DDTM de la Somme.

CETE Sud-Ouest. (2003-2006). PPRN Littoraux, carrières souterraines abandonnées d'Echillais - Estuaire Charente, marais d'Yves, île d'Aix – phase 2, 3 et 4 - Rapports du Laboratoire de Bordeaux pour la DDTM de Charente-Maritime.

CETMEF -Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales- (2013). Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes – Environnements maritime et estuarien. ISBN : 978-2-11-129364-9 ;Référence CETMEF : C 13.01. Avril 2013, 180 p.

CGEDD (2011). Expertise des zones de solidarité Xynthia en Charente-Maritime, Rapport du CGEDD de la Mission N° 007336-02 de Henri Maillot et Christian Pitié, 15 janvier 2011, 10 pages

CIRIA, CUR, CETMEF. (2009). Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques. ISBN : 978-2-11-098518-7 ; Référence CETMEF : P 09.01, 1302 p.

Clus-Auby, C. (2000). La gestion de l'érosion du littoral dunaire Aquitain, Université Michel de Montaigne Bordeaux 3. Thèse de Doctorat de Géographie pour l'Aménagement. 452 p.

Daniel P. et Poitevin J. (1995). Surcotes liées au passage d'un cyclone en Polynésie, rapport interne Météo France.

Dean R.G. et Walton T.L. (2009). Wave setup. In Handbook of coastal and Ocean Engineering, by Young C. Kim ed., World scientific, 1-23.

Dean R. G. (1991) - Equilibrium beach profiles: Characteristics and applications. Journal of Coastal Research, 7, (1), p. 53-83.

DEFRA -Departement For Environnement Food and Rural Affairs- (2005). Joint Probability, R&D Technical report FD2308/TR1 à FD2308/TR3.

Descamps M., Maurin J. (2008) Reconnaissance et caractérisation des brèches anciennes dans les digues de la Loire. Rapport de stage de M1 BGAE spécialité Géosciences parcours Géorisques de l'Université Montpellier II, DIREN Centre.

Desmazes F., et al. (2014) - Méthodologie de détermination du recul maximum des dunes pour les événements extrêmes. BRGM/RP-63157, à paraître.

Devaux E. (2009). Analyse des seiches à partir de l'exploitation de données marégraphiques. Exploitation graphique, analyse fréquentielle et recherche d'éléments déclencheurs. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, promotion 54. 68pp.

Dewez, T.J.B. & Rohmer, J. (2011). Probabilistic rockfall hazard: empirical computation based on ground-based lidar observations in Mesnil Val, Normandy, Journées Aléa Gravitaire, 7-8 September 2011, Strasbourg (France).

DGPR (à venir). Analyse du fonctionnement du littoral. Cahier technique.

Dolan R. et Davis R. E. (1992) - An intensity scale for Atlantic coast northeast storms. Journal of Coastal Research, 8, p. 352-364.

Donnelly C., et al. (2006) - State of Knowledge on Measurement and Modeling of Coastal Overwash. Journal of Coastal Research, p. 965-991.

EDF, CETMEF. Atlas numérique d'états de mer ANEMOC le long des côtes françaises, http://anemoc.cetmef.developpement-durable.gouv.fr.

Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2003). *Guidelines and Specifications for Flood Hazard Mapping Partners*. Appendix D: Guidance for Coastal Flooding Analyses and Mapping.

FEMA (1995) - Guidelines and specifications for wave elevation determination and v-zone mapping. 160p.

FEMA – Federal Emergency Management Agency – (2005). Coastal Flood Hazard Analysis and Mapping Guidelines. Focused Study Report. February 2005.

Filipot J.-F. et Cheung K.F. (2012). Spectral wave modeling in fringing reef environments. *Coastal Engineering*, 67, 67-79

Garcin M., et al. (2011) - Base de données d'observation des effets de la tempête Xynthia sur le littoral. Rapport -BRGM/RP-59395- FR. 23p.

Genz A.S., Fletcher C.H., Dunn R.A., Frazer L.N., Rooney J.J. (2007). The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research,* 23(1), 87–105. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.

Goda Y. (2008). Wave setup and longshore currents induced by directional spectral waves : prediction formulas based on numerical computational results. *Coastal Engineering Journal*, 50(4), 397-440.

Hamm L. (1995). Modélisation numérique bidimensionnelle de la propagation de la houle dans la zone de déferlement. Thèse de doctorat en Mécanique, Université Joseph Fourier, Grenoble I.

Hanslow D. J. and Nielsen P. (1992). Wave setup on beaches and in river entrances. Proc. 23rd Int. Coastal Eng. Conf., Venice, Italy, pp. 240-252.

Hedges, T.S. & Reis, M.T. (1998) Random wave overtopping of simple sea walls: a new regression model Proc. Instn. Civil Engrs. Water, Maritime & Energy, Volume 130, pp. 1-10.

Huxley, C. (2010). Quantification of the Physical Impacts of Climate Change on Beach Shoreline Response, Master of Philosophy, School of Engineering, Civil Engineering University of Queensland.

Kirwan, M. L., G. R. Guntenspergen, A. D'Alpaos, J. T. Morris, S. M. Mudd, and S. Temmerman (2010), Limits on the adaptability of coastal marshes to rising sea level, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L23401, doi:10.1029/2010GL045489.

Kriebel D. L. et Dean R. G. (1985) - Numerical simulation of time-dependent beach and dune erosion. Coastal Engineering, 9, (3), p. 221-245.

Lang M., Lavabre J. (2007). Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations, Update Sciences & Technologies, Editions Quae, ISBN2759200671, 9782759200672, 232p

Larson M. et Kraus N. C. (1989) - SBEACH. Numerical Model for Simulating Storm-induced Beach Change; Report 1. Empirical Foundation and Model Development. Technical Report CERC-89-9,. 267p.

Laudier N. A., Thornton E. B., MacMahan J. (2011). Measured and Modeled Wave Overtopping on a Natural Beach. *Coastal Engineering*, 58(9), 815–825.

Le Cornec E., Fiere M., Grunnet N., (2007). Étude de connaissance des phénomènes d'érosion sur le littoral vendéen. Rapport final, décembre 2007, Rapport GEOS-DHI.

Losada I.J., Lara J.L., Guanche R. and Gonzalez-Ondina J.M., 2008. Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. Coastal Engineering. 55(1), 47-62.

MATE, METL -Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement- (1997). Plan de prévention des risques littoraux (PPR). Guide méthodologique. La documentation française, Paris, 54 p.

MATE, METL -Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement- (1999). Plan de prévention des risques naturels prévisibles (PPR). Guide méthodologique. La documentation française, Paris, 76 p.

MEDDTL (2012) Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte. Vers la relocalisation des activités et des biens. 20 p.

ONERC (2010). Synthèse - Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles. 6p. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/synth_niveau_mer.pdf

Oliveros C., Delpont G. (1999). Littoral oriental corse : Evolution du trait de côte de 1948 à 1996 de Bastia-Furiani à Cervione et de l'embouchure du Travo (Solaro) à Solenzara. Rapport BRGM RR-40504-FR, 22 p.

Patterson, D. (2009). Modelling the Shoreline Impacts of Richmond River Training Walls, Proceedings of the 18th NSW Coastal Conference, 3 – 6 November 2009, Ballina.

Pedreros R. (2006). Détermination des surcotes engendrées par les houles cycloniques en Polynésie – 3 – Cahier des simulations. BRGM/RP-55032-FR, 61p., 29 fig., 16 tabl.

Pedreros R., Krien Y., Poisson B. (2010). Caractérisation de la submersion marine liée aux houles cycloniques en Polynésie française. Rapport BRGM/RP- 58990 -FR, 64 p.

Peeters P., Schoorens J., Le Cornec E., Michard B., Lechat M. (2009). Définition de l'aléa submersion marine sur le site de la Grande Plage de Gâvres (Morbihan). La Houille Blanche, N°1 (Mars 2009), pp. 45-51. DOI : 10.1051/lhb:2009004.

Perret G., Feuillatre L. et FrayssinetP. (1996). Estimations du risque lié aux marées de tempête en Guadeloupe, Etudes et Développement n°2, Météo-France, Direction Interrégionale Antilles-Guyane, 20 pp.

Pons F., Levillain G., Alquier M., Le Gentil J., Delgado J.L. (2007). Élaboration d'un Plan de Prévention de Risques Submersions Marines en Camargue. État des lieux des données existantes. Rapport CETE Méditerranée/DREC, Références : C13OUV00010576, DDE des Bouches du Rhône, 81 p.

Pullen, T., Allsop, W., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schuttrumpf, H & Van Der Meer, J. (2007). EurOtop : Wave overtopping of sea defences and related structure : Assessment manual. 193 pages. EA, ENW, KFKI. Téléchargeable sur *www.overtopping-manual.com.*

Ranasinghe R., Callaghan D., Stive, M.J. (2011) Estimating coastal recession due to sea level rise: beyond the Bruun rule. *Climate change.* June 2010.

Reis, M.T., Hu, K., Hedges, T.S., Mase, H. A., 2008. Comparison of Empirical, Semiempirical, and Numerical Wave Overtopping Models. J. of Coastal Research, 24, 250–262.

Roelvink D., et al. (2009) - Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. Coastal Engineering, 56, (11-12), p.

Rollason V., Patterson D., Huxley C. (2010) Assessing shoreline response to sea level rise : an alternative to the Bruun rule, 19th NSW Coastal Conference.

Sallenger A. H., Jr. (2000) - Storm Impact Scale for Barrier Islands. Journal of Coastal Research, 16, (3), p. 890-895.

Sedan O., Mompelat J.-M. et Terrier M. (1998) Guide d'exploitation des atlas communaux des risques naturels de la Guadeloupe. Rapport BRGM, R 40133, public, 9 pages A3, 1 figure, 2 annexes.

SHOM, CETMEF -Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales- (2008). Statistiques des niveaux marins extrêmes de pleine mer – Manche et Atlantique. Référence CETMEF : C 08-05 ; ISBN : 978-2-11-098357-2.

SHOM, CETMEF -Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales- (2012). Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique). ISBN 978-2-11-128331-2.

SHOM, CETMEF -Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviales- (2013). Note méthodologique relative au produit « Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France » Edition 2012. Référence SHOM : 9 ; Référence CETMEF : 13-005.

SOGREAH (2010). Élaboration d'un document *Éléments de mémoire et retour d'expérience* de l'événement Xynthia, rapport DDTM de Charente-Maritime.

Stephens S.A., Coco G. et Bryan K.R. (2011). Numerical simulations of wave setup over barred beach profiles : implications for predictability. J. of waterway, port, coastal and ocean engng., ASCE, 137(4), 175-181.

Stive, M.J.F., Ranasinghe, R. and Cowell, P. (2009). Sea level rise and coastal erosion. In YC Kim (Ed.), *Handbook of coastal and ocean engineering* (pp. 1023-1038). Imperial College Press.

Stépanian A., Bélon R., Bodéré G., Bacon A., et Campmas L. (2011). Réseau d'Observation du Littoral de la Corse. Rapport d'observations 2010. Rapport BRGM RP-60265-FR, 202 p., 135 ill.

Stockdon H.F., Holman R.A., Howd P.A., Sallenger Jr. A.H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53, 573-588.

SWAN team (2011). User Manual SWAN cycle II version 40.85. téléchargeable sur **http://www.swan.tudelft.nl/**

TAW - Technical Advisory Committee on Water Defences- (2001) Wave run-up and overtopping at dikes, Technical Report A-99-32, Directorate-General for Public Works and Water Management, The Hague.

Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ergul, Ayhan (2009). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0— An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.

Van Gent M. R. A., et al. (2008) - Large-scale dune erosion tests to study the influence of wave periods. Coastal Engineering, 55, (12), p. 1041-1051.

Vellinga P. (1986) Beach and Dune Erosion During Storm Surges.PhD., 169p

Zhangt K., et al. (2001) - Beach Erosion Potential for Severe Nor'easters. Journal of Coastal Research, 17, (2), p. 309-321.

5.6 - Index des encarts

Encart 2 : Quel format de données produire ?.....17
Encart 3 : le Jurisques, une ressource essentielle pour l'élaboration des PPR.....23
Encart 4 : COVADIS.....23
Encart 6 : Exemple d'étude des transits sédimentaires : Étude de connaissance des phénomènes d'érosion sur le littoral vendéen 36
Encart 7 : Front urbain fixé par un ouvrage longitudinal (perré) : Exemple de Lacanau (BRGM).....41
Encart 8 : Prise en compte de l'impact d'ouvrages dans l'estimation du taux d'évolution du trait de côte : Exemple de la côte orientale de la Corse (BRGM).....45
Encart 9 : Bilan des méthodes d'estimation de l'impact d'un événement en termes de recul ponctuel du trait de côte (BRGM).....48
Encart 10 : L'analyse de l'évolution du trait de côte sur une côte à falaises : les falaises de craie de Mers-les-Bains/Le Tréport (CETE Nord-Picardie).....53
Encart 11 : Analyse de l'impact de l'élévation du niveau moyen de la mer sur le recul du trait de côte.....58
Encart 12 : Submersion d'origines multiples : l'exemple de Palavas lors de la tempête de 1997 (CETE Méditerranée).....67
Encart 13 : Les types de données disponibles pour définir le niveau marin à la côte.....71
Encart 14 : Surcote liée aux vagues : origine et évaluation (ARTELIA).....72
Encart 15 : Exemple d'incertitude - Prise en compte des fluctuations du niveau marin.....74
Encart 16 : Exemple d'incertitude - Prise en compte des seiches.....75
Encart 17 : Analyse spécifique des secteurs arrière-littoraux : la bascule des plans d'eau des Salins du Midi (CETE Méditerranée).....76
Encart 18 : Courbes intensité/durée/fréquence et diagramme mono-fréquence : l'exemple de Sète (CETE Méditerranée) 77
Encart 19 : L'analyse des niveaux d'eau extrêmes de l'estuaire de La Gironde (CETE du Sud-Ouest).....80
Encart 22 : Revue des méthodes d'estimations des franchissements (ARTELIA).....88
Encart 23 : Calcul des débits de franchissement à Gâvres – PPRL Gâvres (DHI).....88
Encart 24 : Estimation des franchissements sur la plage du Tréport (CETE Normandie-Centre).....89
Encart 25 : Présentation des méthodes de caractérisation utilisées en Guadeloupe et son archipel (BRGM).....99
Encart 26 : Méthode de caractérisation de l'aléa submersion marine retenue dans le cadre de l'élaboration du PPR de l'estuaire de la Charente – Marais d'Yves – Ile d'Aix (CETE du Sud-Ouest).....101
Encart 27 : Méthodologie de caractérisation de l'aléa submersion marine au Tréport (CETE Normandie-Centre).....105
Encart 28 : Présentation des méthodes de caractérisation utilisées en Polynésie Française (BRGM).....107
Encart 29 : Bande de précaution relative aux ouvrages de protection de largeur 100 fois la hauteur de l'ouvrage : Enseignements des brèches sur les levées de la Loire.....114
Encart 30 : Synoptique de production de la carte réglementaire sur la base de l'aléa actuel et 2100.....132
La production de la carte réglementaire est le fruit du croisement de la cartographie des enjeux et de celle de l'aléa selon les règles rappelées ci-dessus.....132
Les cartes simplifiées ci-dessous illustrent les principes d'élaboration du zonage réglementaire.....132
Le zonage réglementaire est réalisé en premier lieu sur la base de l'aléa actuel. Dans un second temps le zonage est complété sur la base de l'aléa à échéance cent ans.....132

5.7 - Index des illustrations :

Illustration 1 : Démarche de l'étude des aléas littoraux....27
Illustration 2 : Recul du trait de côte dans le sud Finistère (Photo : DDTM 29 - UPR)....31
Illustration 3 : Représentation schématique (idéalisée) du recul du trait de côte sur le long terme avec une composante tendancielle et une composante à court terme (Source : CEREGE)....33
Illustration 4 : Positions historiques du trait de côte et transects 34
Illustration 5 : Synthèse des méthodes de détermination du taux de recul annuel (d'après Genz et al., 2007)....35
Illustration 6 : Méthodologie d'analyse des transports sédimentaires et outils de modélisation numérique utilisés (Source : DHI)....37
Illustration 7 : Dérive littorale nette sur l'ensemble de l'unité sédimentaire Fromentine à Saint-Gilles-Croix-de-Vie (valeurs du transit sédimentaire net par sous-unité) (Source : DHI)....38
Illustration 8 : Perré à Wimereux (62) s'étant substitué au trait de côte (Photo : CETMEF)....39
Illustration 9 : Brises-lames à Valras (34) ne se substituant pas au trait de côte (Photo : DREAL LR)....40
Illustration 10 : Estimation du taux moyen de recul annuel en présence d'ouvrages de protection....41
Illustration 11 : Exemple de traits de côte sur la côte Aquitaine (à gauche) et illustration du calcul DSAS (à droite) (D'après BRGM, Aubié et al., 2011)....42
Illustration 12 : Cellules et sous-cellules sédimentaires du littoral aquitain (à gauche) et représentation schématique et régionale des vitesses de recul du trait de côte entre 1966 et 2009 (à droite) (D'après BRGM, Aubié et al., 2011)....43
Illustration 13 : Vue de Lacanau par image satellite GeoEye du 22/08/2009, d'après GoogleEarth (à gauche) ; Epi sud et enrochements (à droite) (photographie, E. Palvadeau, octobre 2010)....44
Illustration 14 : Représentation schématique de l'évolution de la position du trait de côte avec ou sans fixation du trait de côte....44
Illustration 15 : Traits de côte en 1948, 1977 et 1996 au nord du Port de Taverna. Fond cartographique Google Earth – Orthophotographie IGN 2007....45
Illustration 16 : Recul exceptionnel lors de la tempête du 30 mars 2008 à Blainville sur Mer (50) – Photos a, b et c respectivement prises à 8h42, 9h30 et 9h36 (Photos : DDTM 50) 47
Illustration 17 : Recul de dune lors d'une tempête (Source : BRGM)....48
Illustration 18 : Recul exceptionnel de la dune suite à la tempête Xynthia - mars 2010 – La Tranche sur Mer, Vendée (Photo : BRGM)....49
Illustration 19 : Représentation du calcul du volume du stock maximum mobilisable par un événement caractérisé par un niveau d'eau centennal, valeur limite avant disparition de la dune (Source : FEMA, 1995)....50
Illustration 20 : Les trois éléments constituant le profil de plage après tempête pour la méthode DUROS (d'après van Gent et al., 2008)....50
Illustration 21 : Les quatre profils de plage initiaux pris en compte par la méthode de Kriebel et Dean (1993)....51
Illustration 22 : Vue sur les falaises du Tréport et de Mers-les-Bains (Source : CETE NP)....53
Illustration 23 : Détail du pied de falaise du Tréport attaqué par la mer à chaque marée (Source : CETE NP)....54
Illustration 24: Découpage du trait de côte selon les principales orientations des discontinuités observées sur site (Source : Ortholittorale 2000)....55
Illustration 25 : Exemple de découpage de la côte et bilan surfacique du recul entre 1947 et 2011 (Source : Ortholittorale 2000 et CETE Nord-Picardie)....56
Illustration 26 : Versant d'ensevelissement, rive nord de la baie d'Authie (80) (Photo : M-H Ruz)....60
Illustration 27 : Submersion par débordement à Leucate le 17 décembre 1997 (11) (Photo DREAL Languedoc-Roussillon) 63
Illustration 28 : Submersions par franchissement par paquets de mer à Malo-les-Bains (59) le 10 février 2009 (Photo : Jean-Jacques Vynck) et à Ault (80) le 16 mars 1914 (Source : Conseil Général de la Somme)....63
Illustration 29 : Brèches dans le cordon dunaire de la Dune d'Aval à Wissant (62) le 26 février 1990 (Photo : Olivier Beaulieu) et dans une digue de l'estuaire de la Gironde (Photo : groupe Géotechnique, Risques et Bâtiments du LRPC de Bordeaux – 4 mars 2010)....64

Illustration 30 : Effets des chocs de vagues à Fouras (17) lors de la tempête Xynthia (Source : ARTELIA).....64
Illustration 31: Étapes composant la détermination d'un scénario de référence.....65
Illustration 32: Démarche d'analyse de l'aléa submersion marine.....66
Illustration 33 : Plans de situation des étangs palavasiens (fond de plan : Scan 25® IGN).....68
Illustration 34 : Évolution entre 15 et le 25 décembre 1997 des niveaux marins horaires (cm NGF) à Sète (graphique 1), des conditions de houles (m) à Sète (graphique 2), du débit instantané (m3/s) de la Mosson (graphique 3) et des débits moyens journaliers (m3/s) de la Mosson et du Lez (graphique 4).....68
Illustration 35 : Secteur de Palavas-les-Flots (34) en 2003 (Photo : DREAL Languedoc-Roussillon).....69
Illustration 36 : Marégramme de la tempête de 1997 à Sète – Dock Richelieu (Source SHOM).....74
Illustration 37 : Niveaux marins observés, fluctuations du niveau, marées prédites et surcotes observées à La Rochelle et aux Sables d'Olonne du 28 février au 3 mars 2010 (CETE Méditerranée – Données source : SHOM).....75
Illustration 38 : Évolution des niveaux d'eau dans les Bouches-du-Rhône lors de la tempête de novembre 1982 (Données sources : Compagnie des Salins du Midi, Grand Port Maritime de Marseille, Réserve Naturelle de Camargue).....77
Illustration 39 : Courbe intensité/durée/fréquence des surcotes horaires à Sète et positionnement des tempêtes du 10 octobre 1987, du 16 décembre 1997 et du 4 décembre 2003 par rapport à celles-ci.....78
Illustration 40 : Diagrammes moyens normalisés des niveaux marins (à gauche) et surcotes horaires (à droite) à Sète (en haut) et à Port-Vendres (en bas).....79
Illustration 41 : Tableau de synthèse de l'analyse statistique des quantiles de niveaux d'eau associés à une période de retour.....81
Illustration 42 : Synthèse des événements de référence retenus le long de l'estuaire.....82
Illustration 43 : Tableau de synthèse des caractéristiques des événements de référence retenus sur l'estuaire.....82
Illustration 44 : Démarche du choix de l'événement naturel de référence.....84
Illustration 45 : Situation géographique de la commune de Fouras, au fond du Pertuis d'Antioche (Données : PlanetObserver, Source : Géoportail).....85
Illustration 46 : Évolution du débit (m3/s) et des volumes entrants (m3/ml) en fonction des variations du niveau marin au cours du temps, calculés avec une loi de seuil.....87
Illustration 47 : Localisation de profils à Gâvres (à gauche) et exemple de profil de plage (à droite).....89
Illustration 48 : Débits franchissants caractéristiques de chaque secteur pour l'événement du 10 janvier 2001.....89
Illustration 49 : Familles d'ouvrages concernées par le calcul des franchissements a) Perré maçonné (1990) b) Perré en enrochements c) Cordon de galets.....90
Illustration 50 : Démarche simplifiée de prise en compte des ouvrages 93
Illustration 51 : Démarche simplifiée de prise en compte des cordons dunaires.....97
Illustration 52 : Démarche simplifiée de choix de la méthode de caractérisation de l'aléa submersion marine.....98
Illustration 53 : « Risque de surcote » le long des côtes guadeloupéennes et correspondance avec l'intensité des surcotes (en cm) en fonction de l'intensité du vent (en nœuds) (Perret et al., 1996).....100
Illustration 54 : Les niveaux marins de référence retenus dans le PPR Estuaire de la Charente – Marais d'Yves – Ile d'Aix 101
Illustration 55 : Cotes altimétriques des laisses de submersion de la tempête 1999 sur la commune de Yves.....102
Illustration 56 : Extrait de la carte des isovaleurs de cotes d'eau de la commune de Yves.....103
Illustration 57 : Carte des hauteurs d'eau de la commune de île d'Aix.....104
Illustration 58 : Dépression (figurée par un liseré blanc) repérée par la topographie et les laisses de l'inondation de février 1990 (à gauche) et loi cote/volume associée à cette zone (à droite). Source : CETE Normandie-Centre.....105
Illustration 59 : Schématisation d'un modèle à casier.....107
Illustration 60 : Exemple de la cartographie de l'aléa submersion marine.....108
Illustration 61 : Cartographie de l'aléa submersion marine à Avatoru (Archipel des Tuamotu, Atoll Rangiroa) (Source : Pedreros et al., 2010).....109
Illustration 62 : Topographie de Gâvres sans prise en compte et avec prise en compte des bâtiments (Source DHI, Peeters et al., 2009).....110
Illustration 63 : Comparaison des méthodes de prise en compte du bâti.....111
Illustration 64 : Submersion marine à St-Pierre (Martinique) lors du passage du cyclone Omar le 16/10/2008 : déferlement des vagues sur les habitations et franchissement (Photo : A.V. Barras, BRGM).....113

Illustration 65 : Définition de la bande de sécurité derrière un ouvrage....114
Illustration 66 : Identification de la brèche du val de Gien de 1856 sur a) photographie aérienne de 2005 (IGN) b) scan 25 (carte IGN)c) scan 25 (carte IGN) et MNT lidar de 2002 (Source : Descamps, 2008)....114
Illustration 67 : Analyse de la brèche du château de l'Isle a) MNT - Scan 25 ® IGN© b) profil en travers de la topographie entre la levée et le château de l'Isle....115
Illustration 68 : Possibilités de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement (source: guide PPR inondations, note complémentaire sur le ruissellement péri-urbain)....117
Illustration 69: Cartographie des enjeux....132
Illustration 70: Cartographie de l'aléa....132
Illustration 71: Zonage réalisé sur la base de l'aléa de référence....132
Illustration 72: Prise en compte de l'aléa 2100....132

5.8 - Table des matières

PRÉFACE....8

INTRODUCTION....11

LE DÉROULEMENT GÉNÉRAL DE LA DÉMARCHE PPRL....13

1.1 - La conduite de la démarche....14

1.1.1 -L'objectif d'un plan de prévention des risques littoraux....14

1.1.2 -Une approche d'ensemble....15

1.1.3 -La mise en place d'un mode projet....16

1.2 - La procédure d'élaboration....18

1.2.1 -L'association et la concertation....18

1.2.2 -La prescription du PPRL....19

1.2.3 -L'élaboration du PPRL....19

1.2.3.a - L'analyse du fonctionnement du littoral....19

1.2.3.b - La caractérisation et qualification de l'aléa....20

1.2.3.c - L'analyse des enjeux....21

1.2.3.d - L'élaboration du dossier réglementaire....21

1.2.4 -La consultation des services et des collectivités....21

1.2.5 -L'enquête publique 22

1.2.6 -L'approbation du PPRL....23

1.2.7 -L'application anticipée....24

1.2.8 -La procédure de révision et de modification des PPRL....24

2 - CARACTÉRISATION ET QUALIFICATION DES DIFFÉRENTS ALÉAS....25

2.1 - Analyse générale du fonctionnement du littoral....26

2.1.1 -Une étude des aléas littoraux en deux phases....26

2.1.2 -Synthèse de l'analyse du fonctionnement du littoral : identification des facteurs à l'origine des aléas littoraux....27

2.1.2.a - Le recul des côtes rocheuses et à falaises....28

2.1.2.b - Le recul des côtes basses meubles et la migration dunaire....28

2.1.2.c - La submersion marine....28

2.1.2.d - Résultats attendus de la phase 1....29

2.1.2.e - Articulation des phases 1 et 2....30

2.2 - Aléa recul du trait de côte (érosion)....31

2.2.1 -Définition du recul du trait de côte....31

2.2.2 -Choix des valeurs de référence....32

2.2.2.a - Détermination du taux moyen de recul annuel Tx....32
2.2.2.b - Détermination du recul maximal ponctuel lié à un événement majeur Lmax....47
2.2.3 -Caractérisation de l'aléa de référence....57
2.2.4 -Qualification de l'aléa....58
2.2.5 -Estimation d'un aléa recul du trait de côte intégrant l'impact du changement climatique....58
2.2.6 -Résultats attendus....59
2.3 - Aléa migration dunaire....60
2.3.1 -Définition de la migration dunaire....60
2.3.2 -Choix des valeurs de référence....61
2.3.3 -Caractérisation de l'aléa de référence....61
2.3.4 -Qualification de l'aléa....61
2.3.5 -Résultats attendus....62
2.4 - Aléa submersion marine....63
2.4.1 -Définition de la submersion marine....63
2.4.2 -Démarche générale....65
2.4.3 -Détermination des scénarios étudiés et de leurs caractéristiques....66
2.4.3.a - Scénario de référence et autres scénarios étudiés....66
2.4.3.b - Phénomènes naturels à l'origine de l'inondation....67
2.4.3.c - Choix de l'événement naturel de référence....69
2.4.3.d - Prise en compte des structures jouant un rôle de protection et de leurs défaillances....91
2.4.4 -Choix de la méthode de caractérisation et de cartographie de l'aléa....98
2.4.4.a - Superposition du niveau marin de référence à la topographie....98
2.4.4.b - Répartition topographique des volumes entrants sur la topographie....104
2.4.4.c - Utilisation de modèles numériques....106
2.4.4.d - Analyses menant à la caractérisation de l'aléa....111
2.4.5 -Qualification de l'aléa....116
2.4.5.a - Échelle de qualification....116
2.4.5.b - Mode de qualification....116
2.4.5.c - Niveau d'aléa très fort....118
2.4.5.d - Autres aléas liés à la submersion marine....118
2.4.6 -Résultats attendus....118

3 - MÉTHODE D'ANALYSE DES ENJEUX....120
3.1 - Objectifs de l'analyse des enjeux....122
3.2 - Périmètre et démarche d'étude....123
3.3 - Enjeux généraux....124
3.3.1 -Les enjeux incontournables....124
3.3.2 -Les enjeux complémentaires....125

3.3.3 -Les autres éléments de contexte....126

4 - ÉLABORATION DU DOSSIER DE PPRL....127

4.1 - La note de présentation et ses annexes....128

4.2 - Le zonage réglementaire....129

4.2.1 -Principes appliqués au zonage réglementaire dans le cadre de la submersion marine....130

4.2.1.a - Elaboration du zonage réglementaire....130

4.2.1.b - La prise en compte des ouvrages de protection « résistant à l'aléa de référence »....133

4.2.2 -Principes appliqués au zonage réglementaire dans le cadre du recul du trait de côte et de la migration dunaire....136

4.2.3 -La représentation cartographique....137

4.3 - Le règlement....138

4.3.1 -La réglementation des projets....139

4.3.1.a - Les dispositions applicables en zones rouges....139

4.3.1.b - Les dispositions applicables en zones bleues....140

4.3.1.c - Les dispositions applicables pour les zones d'intérêt stratégique....140

4.3.1.d - Questions transversales à l'ensemble des zones....141

4.3.2 -Les mesures de prévention, protection et sauvegarde....145

4.3.3 -Les mesures sur les biens et activités existants....146

5 - ANNEXES....148

5.1 - Glossaire....149

5.1.1 -Glossaire général....149

5.1.1.a - Définitions générales....149

5.1.1.b - Notion de « référence »....150

5.1.2 -Glossaire technique....150

5.2 - Sigles....153

5.3 - Synthèse des résultats attendus lors de l'étude des aléas littoraux....154

5.4 - Références juridiques concernant les PPR naturels....157

5.5 - Principales références bibliographique....158

5.6 - Index des encarts....162

5.7 - Index des illustrations :....163

5.8 - Table des matières....166

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergies et climat
Développement durable
Prévention des risques
Infrastructures, transports et mer

Présent
pour
l'avenir

DGPR
SRNH/BRM

La Grande Arche
Arche Paroi Nord
92055 La Défense Cedex
Tél. : 01 40 81 88 65
Fax : 01 40 81 89 83